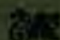


Dr. Ernst Weinschenk,

Anleitung

zum Gebrauche des

Polarisationsmikroskops.



Freiburg im Breisgau.
Herdersche Verlagshandlung.

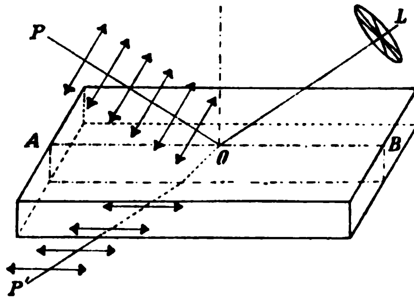
Anleitung

zum Gebrauch des

Polarisationsmikroskops

von

Dr. Ernst Weinschenk,
a. o. Professor der Petrographie an der Universität München.



Mit 100 Textfiguren.

Freiburg im Breisgau.
Herdersche Verlagshandlung.
1901.
Zweigniederlassungen in Wien, Strafsburg, München und St. Louis, Mo.

Herd[illegible]andlung in Freiburg.

Vorrede.

Trotzdem die optischen Methoden der Mikroskopie in den letzten Jahrzehnten eine so überraschende Entwicklung aufweisen, fehlte bis vor kurzem jede moderne, in engem Rahmen gefaſste Darstellung derselben, welche es auch dem Nichtspezialisten ermöglicht hätte, die Errungenschaften dieses Teiles der mikroskopischen Technik in weiterem Maſse zu verwerten. Die zahlreichen Werke über allgemeine Mikroskopie pflegen über die Anwendung des Polarisationsmikroskops mit wenigen Worten hinwegzugehen, und die zusammenfassenden Schriften, welche allein bis in die neueste Zeit über spezielle Untersuchungen mit dem Polarisationsmikroskop vorhanden waren, stellen zum Teil zu hohe Anforderungen an die Vorkenntnisse des Lesers, zum Teil bilden dieselben Bestandteile recht umfangreicher und daher auch sehr teurer Spezialwerke, deren Anschaffung nicht jedem möglich ist.

Wenn nun auch in letzter Zeit einige kurzgefaſste Lehrbücher erschienen sind, welche die hauptsächlichsten Methoden in der Anwendung des Polarisationsmikroskops in leichtverständlicher Weise vorführen, so schien dem Verfasser doch ein kurzer Abriſs wünschenswert zu sein, der in gedrängter Form ebensowohl dem Anfänger als Anleitung zum Arbeiten mit dem Polarisationsmikroskop dienen als dem Erfahrenen in zweifelhaften

Fällen einen zuverlässigen Ratgeber darstellen soll. Möge das vorliegende Büchlein diesem Ziele nur einigermaſsen nahe kommen!

Zu besonderem Danke ist der Verfasser einer Reihe von Fachgenossen verpflichtet, welche ihm durch wertvolle Ratschläge sowie durch Zeichnung von Figuren bei der Ausarbeitung behilflich waren, sowie den Firmen A. Nachet, W. und H. Seibert, Voigt und Hochgesang und C. Zeiss, die ihm die Clichés zu den Abbildungen ihrer Apparate freundlichst überlieſsen.

München, April 1901.

E. Weinschenk.

Inhalt.

Seite

Einleitung 1

Das Polarisationsmikroskop im allgemeinen 5

Die Justierung des Polarisationsmikroskops 18

1. Die Prüfung der Linsensysteme 19
2. Die Zentrierung des Objekttisches 22
3. Die Justierung des Fadenkreuzes und der Nicolschen Prismen . 23

Die Beobachtungen im gewöhnlichen Licht 25

1. Die Beobachtung der Lichtbrechung 25
2. Die Bestimmung von Form und Spaltbarkeit 35
3. Die Messung von Gröfse und Dicke 39
4. Die Beobachtung von Einschlüssen 41
5. Die Beobachtung der Farbe 42
6. Die Erscheinungen im reflektierten Licht 43

Die Beobachtungen im parallelen polarisierten Licht 44

Die optische Beschaffenheit der Krystalle 44

Die Untersuchungen mit einem Nicol. — Pleochroïsmus 51

Die Untersuchungen zwischen zwei Nicols . . 56

1. Die Erkennung der Doppelbrechung 56
2. Die Bestimmung der Lage der Schwingungsrichtungen. Die Stauroskope 58
3. Die Messung der Stärke der Doppelbrechung. Die Interferenzfarben 65
4. Bestimmung der relativen Geschwindigkeit der beiden Strahlen. Charakter der Doppelbrechung. Kompensatoren 74

Die Beobachtungen im konvergenten polarisierten Licht . . . 81

1. Verhalten optisch einachsiger Krystalle im konvergenten polarisierten Licht 85
2. Das Verhalten optisch zweiachsiger Krystalle im konvergenten polarisierten Licht 92

Zwillingsbildungen und optische Anomalien 103

Seite

Anhang. — Nebenapparate 109

1. Die Drehapparate 109
   a) Drehapparate zur Beobachtung zwischen zwei plankonvexen Linsen 110
   b) Drehapparate zur Untersuchung innerhalb von Flüssigkeiten 112
2. Die Erhitzungsapparate 114
3. Die Reproduktionsapparate 115

Register 121

Einleitung.

Die Erforschung der anorganischen Gebilde kann sich nicht im gleichen Maſse wie diejenige der organischen Natur gründen auf eine geradezu unerschöpfliche Fülle von Formen, deren Plastik oft so sehr ins feinste Detail geht, daſs selbst die stärksten und auflösungsfähigsten Objektive unserer modernen Mikroskope noch ungelöste Rätsel übrig lassen. Die Reihe der Formen der anorganischen Körper ist demgegenüber eine recht beschränkte, und nur selten kommen wir in die Lage, bei der Untersuchung derselben zu besonders starker Vergröſserung zu greifen, da nur unter ganz ungünstigen Verhältnissen sich so winzige Bildungen einstellen, daſs man mit einpaarhundertmaliger Vergröſserung dieselben noch nicht deutlich genug beobachten kann.

Bei der unendlichen Fülle chemischer Verbindungen, welche wir bis heute kennen und deren Reihe noch täglich durch neue Entdeckungen in schneller Folge vermehrt wird, ist daher die Art mikroskopischer Forschung, wie sie die Untersuchungen auf dem Gebiete der organischen Natur verfolgen, nur wenig erfolgversprechend, und wenn das Mikroskop, wie es das für den Zoologen, Botaniker und Mediziner heute noch fast ausnahmslos ist, nur ein Apparat wäre, um starke Vergröſserungen zu erzielen, so hätte wohl weder der Chemiker noch auch der Mineraloge irgend welchen Grund, sich mit mikroskopischen Studien zu beschäftigen.

Statt dessen ist aber das moderne Mikroskop ein guter Freund und treuer Ratgeber auch bei den Untersuchungen auf anorganischem Gebiete geworden, es ist eine Art von optischem Universalapparat, welcher uns nicht nur die äuſsere Form, sondern in ebensolchem Maſse auch die innere Struktur der zu untersuchenden Substanzen enthüllt, und der auf verhältnismäſsig raschem

und meist ziemlich mühelosem Wege Resultate liefert, welche sonst nur mit Aufwand von viel Zeit und Arbeit erreicht werden können. Die Umgestaltung des Mikroskops in ein Polarisationsinstrument und die zahlreichen Verbesserungen, welche an demselben in den letzten 30 Jahren angebracht wurden, haben seine Einführung in das Laboratorium des Mineralogen und Chemikers ermöglicht, allerdings, wie es scheinen will, noch nicht in dem Maſse, wie es seiner Vielseitigkeit halber verdienen würde. Zumal in der Chemie, der synthetischen wie der analytischen, ist das groſsartige Hilfsmittel, welches mit dem Mikroskop an die Hand gegeben ist, noch viel zu wenig gewürdigt, und doch ist in zahlreichen Fällen auf keinem andern Wege die Möglichkeit geboten, so rasch und klar die charakteristische Erscheinungsform einer Substanz zu ermitteln, deren sichere Erkenntnis langwieriges Tasten und Probieren unnötig macht.

Vor allem sind die mikroskopischen Methoden der Untersuchung der Gesteine, der Petrographie, dienstbar gemacht worden, und nur der mikroskopischen Untersuchung dankt diese die enormen Fortschritte, welche sie im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts zu verzeichnen hatte. Erst in den allerletzten Jahren wurden dieselben Methoden, welche für den Petrographen so reiche Früchte gezeitigt, in ihrer ganzen Ausdehnung auch auf die chemische Forschung übertragen, wo sie sich allerdings nur mit Mühe Eingang verschaffen können. Aber die wenigen chemisch-mikroskopischen Untersuchungen, welche von durchaus modernem Standpunkt ausgehend alle Hilfsmittel der mikroskopischen Technik sich dienstbar zu machen verstanden, haben Resultate ergeben, welche in hohem Maſse verheiſsungsvoll sind. Wer Gelegenheit gehabt hat, die Methoden der mikroskopischen Analyse eingehender zu studieren, wird zugeben müssen, daſs in derselben bei einiger Übung ein ganz eminent brauchbares Hilfsmittel gegeben ist, um ungewöhnlich schnell, leicht und sicher, selbst bei geringen Mengen, die Zusammensetzung einer Substanz zu erkennen. Und doch sind die optischen Methoden erst zu einem recht kleinen Teil auf dieses fruchtbringende Gebiet angewandt worden. Noch weniger hat sich die synthetische Chemie die mikroskopischen Methoden nutzbar gemacht, so groſs auch der Nutzen speziell für den Organiker wäre, der sich in der enormen Mannigfaltigkeit der Verbindungen kaum mehr zurecht findet, wenn er ein Mittel an der Hand hätte, das ein Identifizieren der erhaltenen Verbindungen rasch und sicher

gestattete. Wenn man weifs, wie schnell man bei einiger Übung im stande ist, an einem krystallinischen Niederschlag alle optischen Eigenschaften im Detail zu ermitteln, und dann die in der chemischen Litteratur üblichen Angaben verfolgt, welche meist nur die einfachsten morphologischen Eigenschaften und selbst diese recht oberflächlich berücksichtigen, die noch dazu gerade sehr häufig das am wenigsten konstante Kennzeichen einer Substanz darstellen, dann wird man es wohl berechtigt finden, wenn dem Chemiker eine eingehende Übung der mikroskopischen Technik auf das dringendste empfohlen wird.

Die Untersuchungsmethoden, welche der Chemiker anzuwenden hat, sind aus der Petrographie übernommen, trotzdem das Material, welches in Frage kommt, in beiden Disziplinen so durchaus verschieden ist. Der Petrograph ist insofern in einer viel ungünstigeren Lage, als er bei seinen Untersuchungen an Dünnschliffen fast stets auf ganz beliebig orientierte Durchschnitte angewiesen ist, während in den Krystallpulvern, welche dem Chemiker vorliegen, die einzelnen Krystalle auf dem Objektivträger infolge ihrer Ausbildung zumeist eine charakteristische Lage einnehmen, welche besonders die wichtige Bestimmung des Krystallsystems sehr erleichtert, eine Frage, die von dem Petrographen in vielen Fällen nur wenig sicher gelöst werden kann. Andernteils stehen dem Petrographen meist zahlreiche, verschieden orientierte Durchschnitte eines und desselben Minerals zu Gebote, so dafs er im stande ist, die Eigenschaften desselben in den verschiedensten Richtungen festzustellen; die einzelnen Krystalle aber, die der Chemiker zu untersuchen hat, zeigen infolge ihrer Ausbildung meist eine sehr ähnliche Lage und bieten dem Forscher daher häufig nicht die Möglichkeit, in alle Details der optischen Beschaffenheit einzudringen. Für die Untersuchungen in beiden Richtungen ist und bleibt die unerläfsliche Vorbedingung eine gewisse Kenntnis der physikalischen Krystallographie, deren Anwendung auf die mikroskopischen Studien mehr oder minder ein Gegenstand länger andauernder Übung ist.

Obwohl die Vergröfserung selbst erst in zweiter Linie die Aufgabe des Polarisationsmikroskops ist, und die übrige optische Ausrüstung den wichtigeren Teil darstellt, so wird trotzdem die erste Anforderung, welche wir an das Instrument zu stellen haben, die sein, dafs die in Frage kommenden Linsenkombinationen möglichst vollkommen seien. Ein möglichst achromatisches, grofses

und ebenes Gesichtsfeld, verbunden mit möglichst bedeutender Lichtstärke der Objektive und Okulare wird für den Mineralogen ebenso wie für den Botaniker, Mediziner und Zoologen das erste sein, was er von seinem Instrument verlangen mufs. Denn die zahlreichen optischen Methoden, welche in der mikroskopischen Technik zur Ausbildung gekommen sind, werden durch diese Linsensysteme vermittelt und sind daher ebenso wie die Beobachtung des Bildes des betreffenden Gegenstandes selbst abhängig von deren Leistungsfähigkeit.

Das Polarisationsmikroskop im allgemeinen.

Das Mikroskop im allgemeinen besteht aus einem Tubus, in dessen oberen Teil das Okular eingesetzt wird, während am unteren Ende das Objektiv angebracht ist; sodann aus dem sogen. Objekttisch, gegen welchen der Tubus durch eine grobe Schraube, den Trieb, und eine Feinstellschraube verschoben werden kann, und in dem eine zentrale Durchbohrung angebracht ist, in welcher der Beleuchtungsapparat sitzt, der von einem darunter befindlichen, in allen Richtungen verstellbaren Spiegel das Licht empfängt.

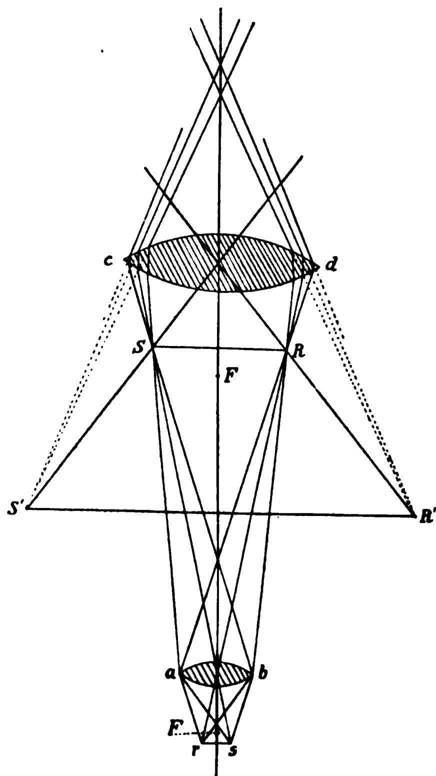


Fig. 1.
Strahlengang im zusammengesetzten Mikroskop.

Als Mikroskop im weiteren Sinne bezeichnet man jede Vorrichtung, durch welche man nahe Objekte vergröfsert sieht. Das einfachste Mikroskop ist daher eine bikonvexe Linse, welche Gegenstände, die um weniger als ihre Brennweite von ihr abstehen, vergröfsert zeigt; man bezeichnet dieselbe gewöhnlich als Lupe. Weit leistungsfähiger ist das sogen. zusammengesetzte Mikroskop, im Sprachgebrauch schlechtweg Mikroskop genannt, welches in der einfachsten Form aus zwei Linsen besteht (Fig. 1). Die eine *ab* mit kurzer Brennweite ist dem Objekt zugewendet und heifst das

Objektiv. Sie entwirft von dem kleinen Gegenstand *rs*, welcher um etwas mehr als ihre Brennweite von ihr absteht, ein vergröſsertes reelles[1] Bild in umgekehrter Stellung bei *SR*. Durch das Okular *cd*, welches diesem Bild näher gerückt ist, als seine Brennweite beträgt, wird dasselbe wie ein selbst Licht aussendender Gegenstand abermals vergröſsert und erscheint bei *S′R′* als virtuelles Bild, welches immer noch die entgegengesetzte Lage hat gegenüber dem Objekt *rs*; man sieht daher im Mikroskop die Gegenstände stets umgekehrt. Das im Mikroskop beobachtete Bild wirkt auf das Auge wie ein 250 *mm* entfernter Gegenstand. Für Bestimmungen der Vergröſserung muſs man die Vergleichung daher stets auf diese Entfernung vornehmen.

Ein näheres Eingehen in die Konstruktion moderner Objektive und Okulare würde hier zu weit führen, zumal dieselben von den leistungsfähigeren Firmen im allgemeinen tadellos ausgeführt werden.

Die zahlreichsten und wichtigsten mikroskopischen Beobachtungen werden in durchfallendem Licht gemacht. Man muſs daher die zu beobachtenden Objekte möglichst so präparieren, daſs sie einesteils hinreichend durchsichtig erscheinen, um ihre innere Struktur deutlich erkennen zu lassen, und daſs andernteils keine Überlagerung verschiedener Individuen mehr vorhanden ist, so daſs also die Objektebene an jeder Stelle nur aus einer einzigen Lage einer einheitlichen Substanz besteht. In den mit der mikroskopischen Untersuchung

---

[1] Der Unterschied zwischen einem reellen und einem virtuellen Bild ist in der Mikroskopie namentlich für Projektion und Photographie von praktischem Interesse. Eine Konvexlinse entwirft ein reelles Bild derjenigen Objekte, welche weiter, als ihre Brennweite beträgt, von ihr entfernt sind, auf der entgegengesetzten Seite in umgekehrter Stellung auſserhalb ihrer doppelten Brennweite, welches dort durch einen Schirm aufgefangen und reproduziert werden kann (Fig. 2). Ist der Gegenstand aber um weniger als die Brennweite entfernt, so vereinigen sich die Strahlen nicht mehr in einem jenseitigen Punkt. Das Bild erscheint in richtiger Stellung auf derselben Seite wie das Objekt, es ist ein virtuelles Bild, das nicht zur projektiven Darstellung gelangt (Fig. 3).

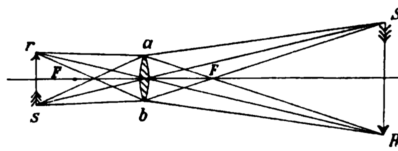


Fig. 2. Reelles Bild.

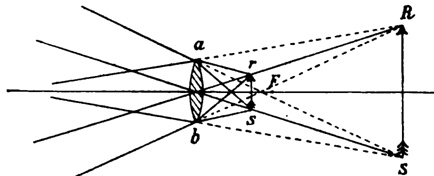


Fig. 3. Virtuelles Bild.

der Organismen sich befassenden Wissenschaften wird dies durch den sogen. Mikrotom in weitestgehendem Mafse erreicht; in der Mineralogie und Petrographie können wegen der Schwierigkeit der Herstellung ebenso dünne Präparate kaum je angewandt werden. Da aber die Struktur der hier in Frage kommenden Bildungen meist um vieles weniger fein ist, genügt im allgemeinen eine aus dem Gestein oder Mineral durch Abschleifen hergestellte Schicht von 0,03—0,05 *mm* Dicke vollkommen; nur in ganz seltenen Fällen und bei besonders fein struierten Objekten werden für die detailliertesten Studien Schichten von 0,01 *mm* und darunter notwendig. Im allgemeinen fertigt man daher für die mikroskopische Untersuchung die sogen. Dünnschliffe in einer durchschnittlichen Dicke von 0,03—0,05 *mm* an, welche auch aus andern, später zu besprechenden Rücksichten sich als die günstigsten erwiesen haben. Die Schliffe werden gewöhnlich mittelst Kanadabalsam auf dem Objektglas festgekittet und können dann, wiederum durch Vermittlung von Kanadabalsam, mit einem dünnen „Deckglas" bedeckt werden, dessen Dicke entsprechend dem geringen Fokalabstand der stärkeren Objektive ca. 0,10—0,15 *mm* betragen kann. Bei den schwächeren Objektiven kommt die Dicke des Deckglases wenig in Betracht; die stärkeren dagegen sind auf eine bestimmte Dicke des Deckglases korrigiert und liefern bei anderer Deckglasdicke weniger scharfe Bilder. Oder aber man läfst die Präparate für bestimmte Spezialuntersuchungen (vor allem die Bestimmung der Lichtbrechung) unbedeckt. Bei sehr sorgfältiger Ausführung der Präparate erreicht man eine ziemlich gleichmäfsige Dicke derselben, welche meist nur gegen den Rand zu etwas abnimmt, wie Figur 4 zeigt, welche einen Querschnitt durch den Rand eines Dünnschliffes in 30- bis 40facher Vergröfserung darstellt. *a* ist das Deckglas, *b* der Schliff, dessen rauhe Aufsenflächen deutlich zu sehen sind, *d* das Objektglas. Der Schliff selbst ist beiderseits in Kanadabalsam *c* eingehüllt. Das Format und die Gröfse des Objektglases spielt eine besondere Rolle, während die Dicke desselben bis zu der von dem Fokalabstand des Beleuchtungsapparates abhängigen Grenze schwanken kann. Am besten bewährt haben sich für Untersuchungen am Polarisationsmikroskop die quadratischen Objektgläser im Format 32 × 32 *mm*, welche in der Petrographie heutzutage fast allgemein in Benutzung sind. Zieht man denselben ein längliches Format vor, so wird man mit Rücksicht auf den drehbaren Objekttisch am Polarisationsmikroskop jedenfalls dasselbe nicht zu lang wählen dürfen, da man sonst beim Drehen des Tisches leicht an die überstehenden Teile anstöfst und so das Objekt fortwährend verschiebt.

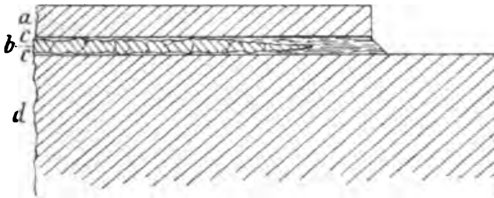


Fig. 4. Querschnitt durch einen Dünnschliff.

Auch die Untersuchung der Gesteine in Pulverform, die älteste Methode der mikroskopischen Gesteinsanalyse, liefert öfters zur raschen Orientierung gute Resultate; gut spaltbare Mineralien geben in dünnen Spaltblättchen häufig sehr charakteristische optische Reaktionen, und wenn es sich um die Erforschung künstlicher Krystallisationen handelt, so

wird man in zahlreichen Fällen am besten zum Ziel kommen, wenn man die aus einem Tropfen der Lösung auf dem Objektglase beim Verdunsten sich ausscheidenden Krystalle mikroskopisch untersucht, oder wenn man ein aus kleinsten Kryställchen bestehendes Pulver in Kanadabalsam oder eine andere Flüssigkeit eingebettet für die Untersuchungen verwendet.

Einige Worte sollen hier noch dem Beleuchtungsapparat gewidmet werden. Der sogen. Beleuchtungsapparat, welcher zum Durchleuchten der Präparate dient, ist in der Hauptsache nichts anderes als ein umgekehrtes Objektiv einfachster Konstruktion. Für die Verwendung starker Systeme mufs der Beleuchtungsapparat, wenn er die gesamte Leistungsfähigkeit derselben auszunutzen gestatten soll, mindestens dieselbe numerische Apertur[1] haben wie das Beobachtungssystem selbst. Es werden an denselben aber weder in Bezug auf Achromatie (nur für Mikrophotographie wird zweckmäfsig ein achromatischer Beleuchtungsapparat angebracht) noch auch auf scharfe Abbildung besonders hohe Anforderungen gestellt; dagegen mufs, wegen der gröfseren Dicke der Objektträger, seine Brennweite ziemlich bedeutend sein. Im allgemeinen wählt man als Beleuchtungsapparate verhältnismäfsig einfache Linsenkombinationen. Der grofse Abbesche Beleuchtungsapparat

[1] Als numerische Apertur (kurz Apertur) A eines Objektivs bezeichnet man nach Abbe das Produkt aus dem Sinus des halben Öffnungswinkels u und dem Brechungsexponenten n des zwischen dem Objekt und den Linsensystemen befindlichen Mediums. Für alle Trockensysteme ist daher $A < 1$, da $n = 1$ und $\sin u$ stets < 1 ist. Bei den Immersionssystemen steigt sie bis 1,40 bei Anwendung der gewöhnlichen Konstruktionen, die als Immersionsflüssigkeit Cedernöl mit $n = 1{,}515$ voraussetzen. Fig. 5 zeigt das Verhältnis des Strahlenganges bei Anwendung eines Trockensystems (rechts) und einer Immersion (links). Neukonstruktionen von Objektiven aus stärker brechendem Glas mit Bromnaphthalin ($n = 1{,}656$) besitzen eine Apertur bis zu 1,60, wobei aber zu bemerken ist, dafs eine Erhöhung des Brechungsexponenten der Immersionsflüssigkeit allein ohne Vorteil ist, wenn nicht gleichzeitig alle andern zwischen Objekt und Frontlinse des Objektivs befindlichen Medien (vor allem Objekt- und Deckglas) dieselbe Erhöhung des Brechungsexponenten erfahren. Wie aus Fig. 5 ferner hervorgeht, ist bei Gebrauch der gewöhnlichen Immersionssysteme die Anwendung stärker lichtbrechender Flüssigkeiten zwecklos, da dann der Brechungsexponent der Frontlinse dieser Objektive selbst ein geringerer ist als derjenige der Flüssigkeit und die Apertur durch den niedrigsten Brechungsexponenten bestimmt wird, welcher an irgend einer Stelle zwischen Beleuchtungsapparat und Frontlinse (diese inbegriffen) vorhanden ist. Die Apertur des Objektivs bestimmt dessen Vergröfserung, Auflösungsfähigkeit und Lichtstärke, sowie die Gröfse des Gesichtsfeldes bei Untersuchungen in konvergentem polarisiertem Licht.

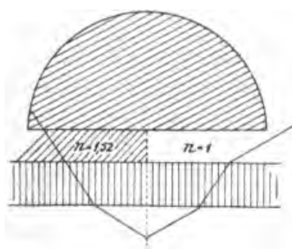


Fig. 5. Homogene Immersion und Trockensystem.

vereinigt die Vorteile einer grofsen numerischen Apertur (= 1,40, wenn er als Immersion zur Verwendung kommt), welche den stärksten Immersionsobjektiven entspricht, mit einem selbst für die schwächsten Objektive genügend grofsen beleuchteten Sehfeld. Bei Polarisationsmikroskopen, bei welchen Objektive mit so grofser Apertur nur selten in Frage kommen, wird er aber nur ausnahmsweise angewandt, da aufserdem ein ungewöhnlich grofser Polarisator erforderlich ist, wenn seine Apertur ganz ausgenutzt werden soll, was den Preis des Instrumentes sehr erheblich erhöht. Man begnügt sich hier mit einer über dem Polarisator befestigten Beleuchtungslinse, welche das grofse Sehfeld der schwachen Objektive gleichmäfsig erhellt, und einer weiteren, abnehmbaren Linse oder Linsenkombination, dem sogen. Kondensor, welcher zusammen mit der zuerst genannten Linse ein System giebt, das als Immersion verwendet eine Apertur von 1,25—1,27 besitzt, also für die bei mineralogischen Untersuchungen im höchsten Fall in Frage kommenden Immersionssysteme mit einer Apertur = 1,27 ca. gerade ausreicht.

Das Polarisationsmikroskop unterscheidet sich von dem gewöhnlichen Mikroskop in erster Linie durch die Vorrichtungen zur Erzeugung von geradlinig polarisiertem Licht. Das gewöhnliche Licht führt seine Schwingungen in rascher Aufeinanderfolge in allen Ebenen des Ebenenbündels aus, dessen Achse seine Fortpflanzungsrichtung ist, wie das schematisch Fig. 6 darstellt. Geradlinig polarisiertes Licht dagegen schwingt fortdauernd in einer und derselben Ebene (Fig. 7), und man bezeichnet die zu dieser senkrechte Ebene, in welcher also deren Pole liegen, als die Polarisationsebene des Lichtes, d. h. die Polarisationsebene eines Lichtstrahls ist stets senkrecht zu seiner Schwingungsebene.

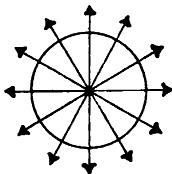


Fig. 6. Gewöhnlicher Lichtstrahl.

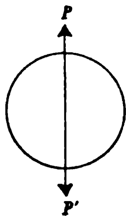


Fig. 7. Polarisierter Lichtstrahl.

Das gewöhnliche Licht wird durch Reflexion oder Brechung in teilweise polarisiertes Licht umgewandelt, am vollständigsten durch Reflexion unter einem von der Lichtbrechung der reflektierenden Substanz abhängigen Winkel, welcher so beschaffen ist, dafs der reflektierte Anteil des unter demselben einfallenden Lichtes auf dem gebrochenen senkrecht steht; man nennt denselben den Polarisationswinkel der betreffenden Substanz (für gewöhnliches Glas ca. 33°). Durch wiederholte Reflexion unter diesem Winkel wird die Polarisation vollkommener, und man wendet deshalb zu diesem Zwecke Sätze dünner Glasplatten an, welche ziemlich gut polarisiertes Licht liefern.

Ein Strahl gewöhnlichen Lichtes *L* (Fig. 8), welcher unter dem Polarisationswinkel auf einen Glasplattensatz auffällt, wird von demselben teilweise als geradlinig polarisierter Strahl *P* reflektiert, dessen Schwingungsebene senkrecht zur Einfallsebene *LOB* des Lichtes ist. Der durch den Glasplattensatz hindurchgehende, gebrochene Anteil des Lichtstrahls, *P'*, anderseits ist gleichfalls, wenn auch in geringerem Maſse, polarisiert; seine Schwingungsebene ist senkrecht zu jener des reflektierten Strahls, fällt also mit der Einfallsebene des Lichtes zusammen. Die Polarisation des gebrochenen Strahls ist um so vollkommener, je kleiner der Einfallswinkel des Lichtes ist. Es kommt daher die durch Brechung hervorgebrachte Polarisation namentlich bei sehr starken Objektiven störend in Betracht, welche die Lichtstrahlen sehr schief durchsetzen. Die Polarisation des Lichtes, welche durch Reflexion oder Brechung erreicht wird, ist aber in keinem Falle eine so vollkommene, daſs sie für feinere Messungen im polarisierten Licht ausreicht, und man bedient sich daher nur an den einfachsten und billigsten Instrumenten des durch Reflexion polarisierten Lichtes, während an besseren Polarisationsmikroskopen Nicolsche Prismen angebracht sind, welche das Licht vollkommen polarisieren.

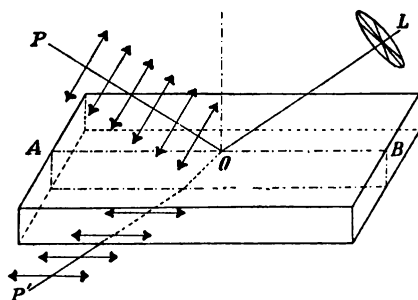


Fig. 8. Polarisation durch Reflexion und durch Brechung.

Die Konstruktion der Nicolschen Prismen oder Nicols schlechtweg beruht auf der Eigenschaft doppelbrechender Krystalle, einen gewöhnlichen Lichtstrahl in zwei senkrecht zu einander polarisierte zu zerlegen, welche in verschiedener Weise abgelenkt werden. Die ursprüngliche, von Nicol angegebene Form (Fig. 9) geht von einem länglichen Spaltungsstück von Kalkspat aus, dessen beide Endflächen zunächst so abgeschnitten werden, daſs sie statt 71° nur noch 68° mit den Längskanten bilden. Nun wird senkrecht zu diesen künstlichen Flächen der Kalkspat durchgeschnitten und die beiden Hälften in richtiger Lage durch Kanada-

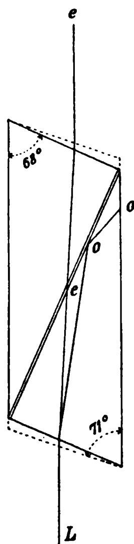


Fig. 9. Konstruktion eines Nicolschen Prismas.

balsam wieder aneinander gekittet. Von den beiden senkrecht aufeinander polarisierten Strahlen, welche durch die eine Hälfte des Prismas hindurchgehen und an die aus Kanadabalsam hergestellte Grenzschicht gelangen, wird der eine *o* stärker gebrochen als der andere *e*. Da ferner in derjenigen Richtung, in welcher der erstere *o* seine Schwingungen ausführt, der Kalkspat ein optisch bedeutend dichteres Medium gegenüber dem Kanadabalsam darstellt, wird dieser Strahl bei der geringen Neigung, unter welcher er auf die Grenzschicht auftrifft, an dieser total reflektiert und so aus dem Gang der Strahlen eliminiert. Der andere *e* dagegen, der eine dem Kanadabalsam viel näher stehende Lichtbrechung aufweist und auch unter gröſserem Winkel auf die Grenzfläche auffällt, geht durch die Kombination hindurch. Es liefert so das Nicolsche Prisma in einer Ebene polarisiertes Licht, dessen Schwingungsebene diejenige des Strahls *e* ist, welcher parallel zu der kurzen Diagonale des rhombischen Querschnittes des Spaltungsstückes schwingt.

Diese ursprüngliche Form wurde später mannigfach geändert und modifiziert; besonders viel gebraucht wird die von Hartnack und Prazmowsky in Vorschlag gebrachte Abänderung, bei welcher neben den Vorteilen einer geraden Endfläche eine viel ausgiebigere Ausnutzung des Kalkspates hervorzuheben ist.

Auch Prismen aus Natronsalpeter, welcher sich infolge seiner optischen Eigenschaften noch besser zu solchen Apparaten eignet, wurden in letzter Zeit mehrfach empfohlen; sie scheinen wegen des stark hygroskopischen Materials wenig Eingang gefunden zu haben. Dagegen versprechen die aus Kombinationen von Glas mit Kalkspat bezw. Natronsalpeter hergestellten Prismen ziemlich viel Erfolg, wobei entweder die obere Hälfte des Nicols aus einer Glassorte angefertigt wird, deren Lichtbrechung und Dispersion möglichst genau mit derjenigen des Strahls *e* im Kalkspat übereinstimmen; oder es werden nur dünne Spaltungsstücke des betreffenden doppelbrechenden Materials zwischen zwei Glaskeile eingekittet. Man soll mit solchen Kombinationen noch vollkommenere Polarisation des Lichtes erzielen können als mit reinen Kalkspatprismen, bei welchen von den Rändern reflektiertes Licht stets eine gewisse Rolle spielt. Da aber die Übereinstimmung der Brechungsexponenten und namentlich der Dispersion noch nicht vollkommen erreicht wurde, können dieselben nur als Polarisatoren, nicht auch als Analysatoren verwendet werden, indem sie nicht völlig achromatisch sind. Die Bezeichnung „Nicol“ hat man im allgemeinen für alle diese Konstruktionen beibehalten.

Fig. 10 (S. 12) giebt die Abbildung eines einfacheren Polarisationsmikroskops nach einer Konstruktion von W. und H. Seibert, dessen Durchschnitt in Fig. 11 (S. 13) dargestellt ist. Die Spiegelbeleuchtung, Okular und Objektiv, die Bewegung

Fig. 10.
Polarisationsmikroskop von W. u. H. Seibert in Wetzlar.

des Tubus durch Trieb und Feinstellschraube sind dieselben wie an den gewöhnlichen Mikroskopen. Eine ganze Reihe verschiedener Modifikationen aber weist dasselbe in seinen einzelnen Teilen gegenüber den gewöhnlichen Modellen auf. Zunächst ist im inneren Brennpunkt der Huyghensschen Okulare ein aus zwei genau senkrecht zu einander gespannten Spinnwebfäden bestehendes Fadenkreuz *F* angebracht, dessen genaue Orientierung in Beziehung auf das Instrument durch eine Marke bewirkt wird, welche aufsen an dem Okular befestigt ist, und die in einen Ausschnitt eingreift, welcher sich am oberen Ende des Tubus befindet.

Der das Okular tragende Teil des Tubus ist ausziehbar und besitzt unterhalb des Okulars einen Schlitz *S* zum Einführen der Bertrand-Amicischen Linse. Die Trommel *m* der Mikrometerschraube zur Feinstellung des Objekts weist, bei den gröfseren Instrumenten wenigstens, eine Teilung auf, um die vertikale Verschiebung des Objektivs mittels der Feinstellschraube genau messen zu können. Es ist schon aus diesem Grunde zweckmäfsig, wenn die Trommel der Feinstellschraube an dem Stativ oben, nicht wie bei älteren Konstruktionen unten, angebracht ist.

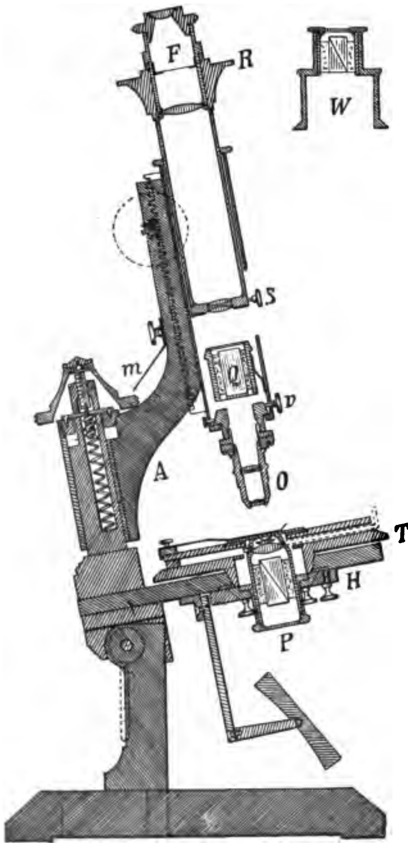


Fig. 11.
Durchschnitt durch das Polarisationsmikroskop.

Der Trieb *k* für die grobe Einstellung soll, wegen der häufigeren Verwendung von zum Teil recht hohen Drehapparaten, eine sehr bedeutende Höhe haben, so dafs das Objektiv innerhalb weiter Grenzen vertikal beweglich ist; und der Arm *A* des Stativs, welcher den Tubus trägt, mufs möglichst hoch geschweift sein, um bei einer Drehung dieser Nebenapparate auf dem Objekttisch denselben den ungehinderten Durchgang zu gestatten.

Innerhalb des Tubus sitzt gewöhnlich ein Nicolsches Prisma, der Analysator *Q*, welcher in horizontaler Richtung aus demselben herausgezogen werden kann. Es ist zweckmäfsig, wenn derselbe mittels einer Führung *f* um 90° gedreht werden kann, wobei eine Kreisteilung den Grad der Drehung angiebt. In andern Fällen ist er fixiert, und man benutzt dann ein weiteres Nicolsches Prisma *W*, welches drehbar auf das Okular aufgesetzt werden kann; zum Behufe der Ablesung dieser Drehung trägt das Okular den geteilten Ring *R*. Letztere Form des Analysators ist bei den älteren Modellen allein vorhanden, heutzutage aber wird wohl stets der im Tubus eingeschobene Analysator bevorzugt.

Im unteren Ende des Tubus befindet sich ein Einsatz, an welchem, am besten mittels einer sogen. Objektivzange *Z*, das Objektiv *O* befestigt wird. Oberhalb der Zange trägt der Tubus einen Schlitz *c*, in welchen die zwischen schmalen Glasplättchen eingelegten Kompensatoren eingeschoben werden können. Das Einsatzstück selbst, welches die Objektive trägt, ist durch zwei aufeinander senkrecht wirkende Mikrometerschrauben *v* und *v'* mit entgegenstehender Federung um einen geringen Be-

trag gegen den Tubus in horizontaler Richtung verschiebbar, um so nach jedesmaligem Wechsel des Objektivs dessen Achse genau auf die Drehungsachse des Objekttisches zentrieren zu können; man nennt dieselben daher Zentrierschrauben.

Die Zentrierung kann an andern Modellen am Tisch des Mikroskops vorgenommen werden, d. h. anstatt dafs man die Achse des Objektivs auf die Drehungsachse des letzteren richtet, verschiebt man das Zentrum des Tisches durch zwei analoge Zentrierschrauben. Die Zentrierung am Tische ist indes weit weniger zu empfehlen, da sie die Stabilität desselben, die namentlich bei starken Vergröfserungen sehr in Betracht kommt, oft bedeutend stört.



Fig. 12. Polarisationsmikroskop nach A. Nachet in Paris.

Da man die häufige Notwendigkeit der ziemlich zeitraubenden genauen Zentrierung namentlich früher, als die Objektive ausschliefslich eingeschraubt wurden, ungemein lästig empfand, wurden einige Modelle konstruiert, welche eine solche Zentrierung überhaupt unnötig machen. So sind in dem in Fig. 12 wiedergegebenen französischen Modell (Nachet in Paris) Objektiv und Tisch durch einen kräftigen Arm verbunden und gleichzeitig drehbar, wodurch natürlich jede exzentrische Drehung vermieden wird. Eine neuere Konstruktion, welche denselben Fehler zu vermeiden sucht, wurde zuerst in England angefertigt und ist in Fig. 13 (S. 15) nach einem Modell von Voigt und Hochgesang in Göttingen abgebildet. Es sind hier die beiden Nicols gleichzeitig drehbar gemacht, wob [illegible] ng des einen durch eine vertikale

Zahnstange auf das andere übertragen wird. Das Objekt bleibt unbeweglich auf dem Objekttisch. Modelle dieser letzteren Konstruktion haben namentlich beim Arbeiten mit den am Schlufs zu besprechenden Drehapparaten viel Anklang gefunden und werden daher in den verschiedensten Ausführungen angefertigt.

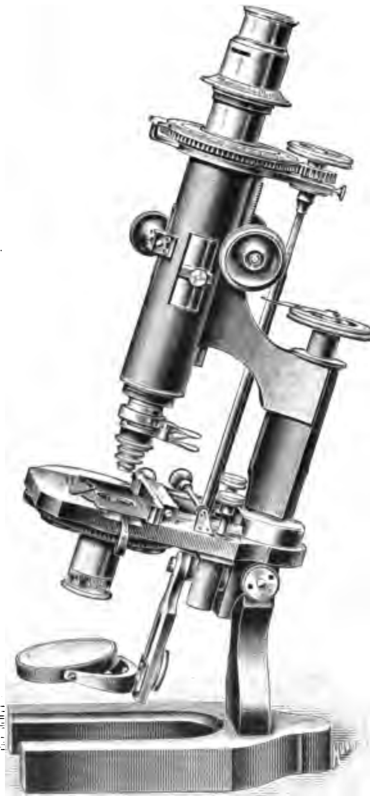


Fig. 13. Polarisationsmikroskop mit gleichzeitig drehbaren Nicols (Voigt u. Hochgesang in Göttingen).

Der Objekttisch *T* in Fig. 10 und 11 ist um eine vertikale Achse drehbar und trägt an seinem Rande eine Gradteilung, welche an einer Marke die Ablesung des Betrages der Drehung gestattet. Häufig wird diese Marke als Nonius ausgeführt, was aber im allgemeinen zwecklos ist, da die Genauigkeit mikroskopischer Messungen viel zu gering ist, um eine Sicherheit über $^1/_4{}^0$ hinaus zu gestatten, ein Betrag, der sich noch leicht schätzen läfst. Der Objekttisch trägt ferner eine Reihe von Durchbohrungen, welche zum Einsetzen von Nebenapparaten in bestimmter Stellung dienen. Von diesen letzteren kommen zunächst die sogen. Objektklammern in Betracht, die bei geneigter Stellung des Instrumentes zum Festhalten der Objekte dienen, und von welchen besonders die in Fig. 14 abgebildete Form empfehlenswert ist, da sie gleichzeitig ein rasches Einstellen markierter Partien in das Zentrum des Gesichtsfeldes gestattet. Ferner ist es zweckmäfsig, wenn der Objekttisch durch eine Klemmschraube in beliebiger Stellung fixiert werden kann.

Für Untersuchungen namentlich mit den stärkeren Systemen wird an den gröfseren Modellen häufig ein sogen. Kreuzschlittentisch angebracht, welcher die horizontale Verschiebung des Präparates durch zwei senkrecht aufeinander wirkende, mittelst Schrauben bewegliche Schlitten ermöglicht. Man erleichtert mittels dieses Apparates ein viel gleichmäfsigeres Absuchen des ganzen Prädarates, da man von den mehr oder minder willkürlichen Verschiebungen durch die Hand unabhängig ist. Man kann auch mittels einer an den Schlitten angebrachten Teilung den Tisch als Finder verwerten, indem man die Stellung



Fig. 14.

der Teilungen bei einer bestimmten, fixierbaren Lage des Objektes auf dem Tische notiert.

Unterhalb des Tisches befindet sich an dem in Fig. 10 und 11 abgebildeten Modell eine Schlittenführung *H* mit zentraler Durchbohrung, innerhalb deren ein Rohr in vertikaler Richtung durch einen Hebel bewegt werden kann. In dem Rohre sind der Beleuchtungsapparat und das zweite Nicolsche Prisma, der Polarisator *P* angebracht. Am zweckmäfsigsten ist es, wenn sowohl der Polarisator als auch der Beleuchtungsapparat allein aus der Rohrfassung entfernt werden kann, jedes Stück also für sich in getrennter Fassung sich befindet. Der Beleuchtungsapparat, welcher in diesem Rohr sitzt, ist gewöhnlich sehr einfach: eine Linse von geringer Apertur, auf welcher ein weiteres Linsensystem von grofsem Öffnungswinkel, der Kondensor, frei aufsitzt, welcher zum Zweck der Beobachtung mit sehr schwachen Objektiven mittels einer innerhalb des drehbaren Objekttisches beweglichen Zange gefafst und aus dem Gesichtsfeld weggeklappt werden kann. Wenn derselbe auf dem Polarisator aufsitzt und von der Zange freigelassen wird, ist er samt dem Polarisator und dem übrigen Beleuchtungsapparat in vertikaler Richtung beweglich. Eine Irisblende, wie sie an zoologisch-medizinischen Instrumenten nicht zu fehlen pflegt, wird nur an den gröfseren Modellen der Polarisationsmikroskope angebracht, da sie eine ziemliche Komplikation des Apparates bedeutet und in ihrer Wirkung ersetzt werden kann durch die vertikale Hebelbewegung, welche an dem Beleuchtungsapparat angebracht ist.

Der Polarisator kann gedreht werden, und die Fassung trägt entweder eine Reihe von Ausschnitten, in welche eine am Polarisator angebrachte Marke eingreift, oder aber eine Kreisteilung, um jederzeit eine genaue Einstellung desselben parallel zu den Fäden des im Okular angebrachten Fadenkreuzes zu gestatten.

An Stelle der oben besprochenen Zange, welche das Entfernen des Kondensors ermöglicht, sind hierfür noch eine Reihe anderer Konstruktionen vorgeschlagen worden, welche das lästige Herausnehmen des Kondensors mit der [illegible] das früher allgemein üblich war, ersetzen sollen. Entweder befindet
s[illegible] [illegible]densor [illegible] einem einfachen Schieber im Tisch des Mikroskops
[illegible] läß[illegible] überhaupt keine vertikale Bewegung zu, und eine
[illegible] des Objektglases sowie eine Abstufung der Be-
[illegible] sie ist in einer der Zange analogen, aber ge-
[illegible] auch dann läßt sie sich nur in sehr engen
[illegible] und in [illegible] Falle ist die Beigabe einer
[illegible] oder [illegible]sor kann, unter Erhaltung

seiner vertikalen Beweglichkeit, in einer bestimmten Höhenstellung des Beleuchtungsapparates durch einen Schieber seitlich gefaſst und herausgezogen werden. Endlich ist eine sehr einfache Vorrichtung, bei welcher die Beweglichkeit des Beleuchtungssystems vollständig erhalten bleibt, von Nachet eingeführt worden. Sie besteht in einer seitwärts unterhalb des Objekttisches vorstehenden Schraube, mittels deren man den Kondensor nach Art eines Visiers über den übrigen Teil des Beleuchtungsapparates hinüberklappen kann (Fig. 15).

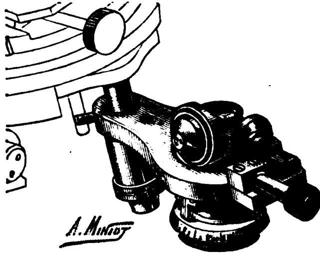


Fig. 15. Vorrichtung zum Entfernen des Kondensors nach A. Nachet.

In einzelnen Fällen, zumal bei sehr starken Objektiven oder sehr lichtschwachen Objekten, erscheint es zweckmäſsig, den Polarisator ganz zu entfernen, da er mehr als die Hälfte des zur Verfügung stehenden Lichtes absorbiert. Deshalb wird er am besten in einer von derjenigen des Beleuchtungsapparates getrennten Fassung gefertigt; so kann er jederzeit allein aus der Rohrfassung herausgezogen werden. Da indes das orientierte Einsetzen desselben mit der Hand sehr zeitraubend ist, wurde von W. und H. Seibert die in Fig. 16 abgebildete Vorrichtung konstruiert, mittels deren man den Polarisator *P* durch Verschieben eines Schlittens mittels der Knöpfe *K* und *K'* unterhalb der Beleuchtungslinsen wegschiebt und mit einer Hülse vertauscht, welche eine Irisblende *J* trägt. Die Einschaltung und Ausschaltung des Polarisators kann so ohne irgend eine Änderung seiner Orientierung durch einfachen Druck und Zug bewirkt werden, und man hat dabei den Vorteil, daſs man jederzeit das Instrument selbst für die feinsten Untersuchungen der organischen Mikroskopie dienstbar machen kann. Der Beleuchtungsapparat ist bei dieser Vorrichtung mittels der Schraube *S* in vertikaler Richtung mitsamt dem Schlitten verschiebbar; der Kondensor *C* kann auch hier mittels der Zange *Z* weggeklappt werden. Daſs man bei dieser Konstruktion an Stelle des einfachen Beleuchtungsapparates auch einen Abbeschen anbringen kann, liegt auf der Hand.

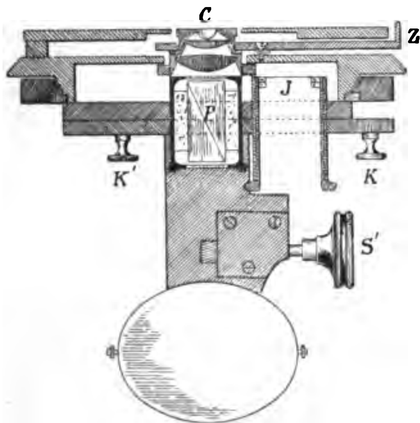


Fig. 16. Vorrichtung zum Ausschalten des Polarisators nach W. u. H. Seibert.

Um besonders bemerkenswerte Partien der Objekte leichter auffinden zu können, verwendet man entweder eine auf dem Objekttisch angebrachte Millimeterteilung, welche auf zwei aufeinander senkrechten Durchmessern aufgetragen ist, und bezeichnet die Teilstriche, welche das betreffende Präparat in der richtigen Stellung berührt; oder man verwendet in ähnlicher Weise die Teilung des beweglichen Kreuzschlittentisches. Man muſs aber dann zum

Wiederfinden der betreffenden Stelle sich natürlich der gleichen Teilung bedienen. Es ist daher besser, man markiert die betreffende Stelle auf dem Präparat selbst, sei es dafs man mit freier Hand einen Farbring um dieselbe anbringt, sei es dafs man einen Objektmarkierer verwendet. Der letztere wird, nachdem die betreffende Stelle genau zentriert ist, an Stelle des Objektivs eingesetzt. Der kleine Apparat trägt entweder eine etwas exzentrisch sitzende, regulierbare Diamantspitze, welche durch Herabdrehen des Tubus in einer federnden Fassung auf das Deckglas aufgesetzt wird; nachdem dies geschehen, dreht man den Tisch mit dem festgeklemmten Präparat und erhält nun einen auf dem Deckglas eingeritzten Kreis, welcher die richtige Stelle umfafst. Oder es ist, gleichfalls in Form eines Objektivs, ein in vertikaler Richtung federnder Einsatz vorhanden, welcher an seinem unteren Ende eine runde Öffnung trägt, die, mit Ölfarbe, Tinte oder Schellacklösung bestrichen, das Abdrücken eines kleinen Kreises auf dem Deckglas des Präparates gestattet.

Falsches, d. h. durch Reflexe irgend welcher Art hervorgebrachtes Licht spielt bei der mikroskopischen Beobachtung eine in viel geringerem Mafse störende Rolle als z. B. bei der Mikrophotographie. Es ist trotzdem unerläfslich, dafs alle Teile des Mikroskops im Innern geschwärzt sind. Solche Reflexe werden aber unter Umständen von den Linsen des Okulars selbst hervorgebracht, so dafs es zweckmäfsig erscheint, in einzelnen Fällen auf das Okular eine Vorrichtung aufzusetzen, die einer Verlängerung der Fassung der Okularlinsen entspricht, und welche das schief auf die Frontlinse des Okulars auffallende Licht abblendet. Anderenteils ist, zumal beim Arbeiten mit schwachen Objektiven, welche einen grofsen Fokalabstand besitzen, das unterhalb des Objektivs auf das Präparat auffallende und von diesem in den Tubus reflektierte Licht oft in hohem Mafse störend. Man schützt sich vor Täuschungen, indem man entweder mit der vorgehaltenen Hand das Licht abblendet, oder durch Anbringung von schwarzen Schirmen, die das einfallende Licht abhalten. Doch müssen solche Vorrichtungen stets in der Weise ausgeführt sein, dafs dadurch keine Störung in der Beweglichkeit des Instrumentes eintritt.

Schliefslich soll noch erwähnt werden, dafs das Arbeiten am Mikroskop im direkten Sonnenlicht den Augen sehr nachteilig ist, und dafs man sich gegen solche schädigende Einflüsse durch Einlage von Scheibchen von Mattglas oder von Blauglas in den Beleuchtungsapparat schützt. Ähnliche Blättchen von Rubinglas verwendet man in seltenen Fällen, in welchen bei mikroskopischen Untersuchungen einfarbiges, homogenes Licht in Frage kommt, wenn eine Vorrichtung zur Erzeugung von Natriumlicht nicht zur Verfügung steht.

Die Justierung des Polarisationsmikroskops.

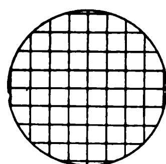
Bevor man ein Mikroskop in Benützung nimmt, wird man sich von seiner Leistungsfähigkeit zu überzeugen haben, sowie davon, ob die einzelnen Teile des Apparates richtig funktionieren. Die Untersuchung umfafst:

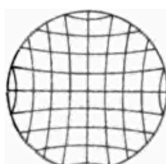
1. die Prüfung der Linsensysteme;
2. die Zentrierung des Objekttisches;
3. die Justierung des Fadenkreuzes und der Nicolschen Prismen.

Dies zusammen bezeichnet man als die Justierung des Instrumentes.

1. Die Prüfung der Linsensysteme.

Die aplanatische Beschaffenheit der Beobachtungslinsen ist das am nächsten in die Augen Fallende, wenn man irgend ein Objekt betrachtet, indem bei einem Mangel in dieser Richtung Zentrum und Rand des Bildes nicht gleichzeitig scharf eingestellt werden können. Bei schwächeren Systemen wird sich dieser Fehler nur selten bemerkbar machen; bei den stärkeren beobachtet man ihn wohl stets in geringem Maſse, und zwar ist die scharfe Einstellung der Mitte des Gesichtsfeldes etwas höher als diejenige des Randes. Viel störender als dieser, sich meist nur wenig — namentlich bei den hier ausschlieſslich in Betracht kommenden dickeren Präparaten — geltend machende Miſsstand ist eine öfter vorkommende Verzerrung der Bilder, die auf einer ungleichen Vergröſserung in verschiedenen Teilen des Gesichtsfeldes beruht. Man erkennt diese am besten an einem in quadratische Felder eingeteilten Glasmikrometer, welches sich in der in Fig. 17 abgebildeten Weise darstellen muſs. Ist dagegen das Bild verzerrt, wie in Fig. 18, so ist das Objektiv für exakte Arbeiten unbrauchbar.


Fig. 17. Objektiv mit gleichmäſsiger Vergröſserung.


Fig. 18. Objektiv mit ungleicher Vergröſserung.

Weitere Ursachen für die Verringerung der Schärfe des Bildes liegen in der sphärischen und der chromatischen Aberration der Linsen. Als sphärische Aberration bezeichnet man die Erscheinung, daſs bei einer stark gekrümmten Linse die am Rand der Linse hindurchgehenden Strahlen in einem weniger entfernten Punkte vereinigt werden als die auf die Mitte treffenden; durch geeignete Wahl der Krümmungshalbmesser muſs man die Abweichung der Strahlen möglichst klein zu machen suchen. Die chromatische Aberration beruht auf der verschiedenen Brechbarkeit der Farben des Spektrums, infolge deren sich die stärker

gebrochenen violetten Strahlen in einem der Linse näher gelegenen Punkt (*v* in Fig. 19) vereinigen, die roten in einem ferneren (*r*). Da nun aber stärkere Lichtbrechung nicht gleichzeitig im selben Mafse erhöhte Farbenzerstreuung mit sich bringt und es z. B. Glassorten (Flintglas) giebt, welche im Verhältnis zur Ablenkung des Lichtes fast doppelt so starke Farbenzerstreuung aufweisen als andere (Crownglas), so kombiniert man die achromatischen Linsensysteme, wie das Fig. 20 zeigt, aus einer Sammellinse *L* von Crownglas und einer Zerstreuungslinse *L'* von Flintglas, welch letztere die von der ersteren zerstreuten Farben in *p* wieder sammelt. Infolge des verschiedenen Mafses der Farbenzerstreuung in verschiedenen Teilen des Spektrums ist aber die Vereinigung in *p* im allgemeinen keine absolut vollkommene, und erst in neuester Zeit ist es gelungen, Linsenkombinationen zu konstruieren, welche die chromatische Aberration in allen Teilen des Spektrums gleichmäfsig aufheben. Man verwendet in zahlreichen Fällen zu ihrer Konstruktion Linsen von Flufsspat, welche infolge der niedern Lichtbrechung und enorm niedern Dispersion eine viel geringere Krümmung gestatten. Durch richtige Kombination gelingt es, mittels solcher Linsen die Farbenzerstreuung des Crownglases in allen Teilen des sichtbaren Spektrums gleichmäfsig aufzuheben. Ein Nachteil liegt in der Seltenheit von Flufsspat, welcher für diese Zwecke klar genug ist, und für das Polarisationsmikroskop vor allem in einer häufig vorhandenen anomalen Doppelbrechung. Man bezeichnet diese Linsen als Apochromate. Solche Systeme werden vorherrschend nur für die stärkeren Vergröfserungen angewandt, bei welchen an und für sich für die Untersuchungen in polarisiertem Lichte die partielle Polarisation der sehr schief hindurchgehenden Strahlen in Frage kommt. Im allgemeinen wird man wegen der bezeichneten Mifsstände bei Untersuchungen im Polarisationsmikroskop derartige Objektive nur selten gebrauchen, zumal auch ein geringes Mafs von Farbenzerstreuung im allgemeinen nicht stört.

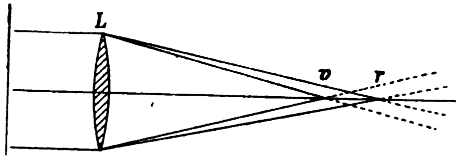


Fig. 19. Chromatische Aberration.

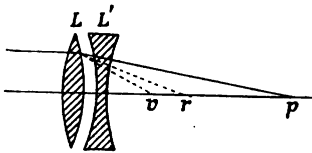


Fig. 20. Korrektur der chromatischen Aberration.

Man prüft ein Objektiv auf seine achromatische Beschaffenheit am einfachsten, indem man den Spiegel etwas nach links schief stellt und ein opakes Korn sucht, das scharf eingestellt wird. Ist eine chromatische Unterkorrektur vorhanden, so erscheint dasselbe im linken Teil des Gesichtsfeldes rötlich, im rechten violett; ist das Objektiv überkorrigiert, so vertauschen sich die Farben.

Die Lichtstärke und die Auflösungsfähigkeit der Objektive prüft man bei leicht mit weifsen beleuchteten Wolken überzogenem Himmel und benutzt dazu die den meisten Mikroskopen beigegebenen Testobjekte, welche gewöhnlich aus Präparaten von Diatomeen bestehen. Vor allem für die stärkeren Objektive, speziell die Immersionssysteme, wird eine solche Untersuchung in Frage kommen. Die brauchbarsten Testobjekte sind: *Pleurosigma angulatum* und *Surirella gemma,* von welch ersterem die Strukturverhältnisse schon mit den stärkeren Trockensystemen gut aufgelöst werden sollen, während die letzten Details der Surirella, speziell eine feine, senkrecht zu den Querrippen verlaufende Streifung derselben, als äufserste Leistungsfähigkeit der Immersionsobjektive von einer numerischen Apertur von ca. 1,27 erscheinen. Das Objekt mufs bei geeigneter Beleuchtung die Skulptur in scharf abgegrenzten Linien erscheinen lassen.

Um den für die zur Verwendung kommenden Objektive mit gröfster numerischer Apertur (in unserem Falle meist nicht über 1,27) ausreichenden Öffnungswinkel des Beleuchtungsapparates zu konstatieren, verwendet man am besten ein dünnes Spaltblättchen von Glimmer, welches man mit dem betreffenden Objektiv in konvergentem polarisierten Licht betrachtet. Wird ein Objektiv mit Immersion benutzt, so mufs auch der Beleuchtungsapparat als Immersion verwendet werden. Das Gesichtsfeld zeigt bei richtiger Einstellung des Objektivs und des Beleuchtungsapparates das Achsenbild bis zum Rand gleichmäfsig erhellt; reicht der Öffnungswinkel des Beleuchtungsapparates nicht aus, so erscheint der Rand des Bildes dunkel; ist andernteils dessen Einstellung nicht richtig, so erblickt man nur einen dem Querschnitt des Polarisators entsprechenden scharf abgegrenzten Teil des Gesichtsfeldes hell.

Die von den besseren Firmen gelieferten Mikroskope werden zu Ausstellungen in den bisher besprochenen Richtungen kaum Anlafs geben. Die Zentrierung der Drehungsachse des Tisches und die Einstellung der Schwingungsrichtungen der Nicols dagegen sind

von zahlreichen Zufälligkeiten abhängig und auch nicht unbedeutenden Änderungen noch während des Arbeitens unterworfen, so dafs eine öftere Revision in dieser Richtung dringend zu empfehlen ist; die dazu notwendigen Vorkehrungen sollen daher eingehender beschrieben werden.

2. Die Zentrierung des Objekttisches.

Das Zentrum der Drehung des Objekttisches mufs möglichst genau in die Achse des Beobachtungssystems fallen, d. h. das Mikroskop mufs zentriert sein, weil sonst die Ortsveränderung, welche ein bestimmtes Objekt bei einer Umdrehung des Tisches im Gesichtsfeld zeigt, einer exakten Beobachtung in hohem Grade hinderlich ist. Zu diesem Zwecke stellt man irgend einen kleinen, womöglich nur punktgrofs erscheinenden Gegenstand in dem Objekt genau in den Schnittpunkt der Fäden des Fadenkreuzes und

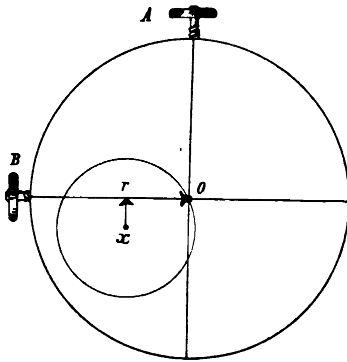


Fig. 21. Zentrierung des Objekttisches.

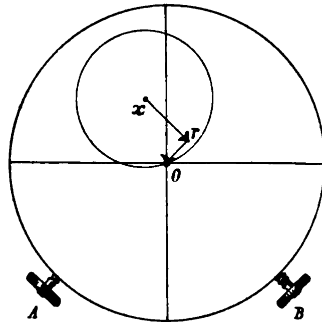


Fig. 22. Zentrierung des Objekttisches.

dreht nun den Tisch um 360°, wobei man die Ortsveränderung des Punktes fortwährend betrachtet. Derselbe wird im allgemeinen einen Kreis beschreiben, dessen Zentrum (*x* in Fig. 21) mit dem Schnittpunkt *o* des Fadenkreuzes nicht zusammenfällt. Man dreht nun die eine Zentrierschraube *A*, bis sich dieser Punkt *x* um die Gröfse *xr* verschoben hat, d. h. auf den quer zu dieser Schraube verlaufenden Faden zu liegen kommt, setzt hierauf die Schraube *B* in Bewegung, bis eine Verschiebung um *ro* erreicht ist, d. h. das Zentrum *x* im Schnittpunkt des Fadenkreuzes zu liegen scheint. Hierauf bringt man den zuerst gewählten Punkt wieder genau in den Kreuzungspunkt der Fäden und kontrolliert, ob er bei einer

vollen Umdrehung des Tisches seinen Platz nicht verändert; oder wenn dies, wie gewöhnlich, noch in geringem Mafse der Fall ist, korrigiert man in derselben Weise die kleinen Fehler, welche sich bei der schätzungsweisen Einstellung ergeben, bis die völlige Zentrierung erreicht ist.

Im allgemeinen wird sich beim Wechseln der Objektive jedesmal eine kleine Dezentrierung einstellen, indes sollen bei einem tadellos gebauten Instrument und bei Anwendung einer Objektivklammer die Fehler nicht so grofs sein, dafs eine merkbare Störung im Arbeiten eintritt. — An einzelnen Instrumenten und namentlich wenn die Zentrierschrauben am Objekttisch angebracht sind, wirken dieselben unter 45° zu den Fäden des Fadenkreuzes, statt diesen parallel zu gehen. Die oben gegebene Anleitung verändert sich dann dementsprechend nach Fig. 22.

3. Die Justierung des Fadenkreuzes und der Nicolschen Prismen.

Zunächst ist es von Wichtigkeit, zu erfahren, ob die Schwingungsrichtung des Polarisators von vorne nach hinten oder von rechts nach links verläuft, wenn man denselben in der durch die Marke angegebenen Stellung angebracht hat. Bei den ursprünglichen Nicols mit rhombischem Querschnitt ist, wie schon früher erwähnt wurde, die Schwingungsrichtung parallel der kurzen Diagonale, bei den verschiedenen neueren Konstruktionen mufs sie von Fall zu Fall bestimmt werden. Man bedient sich dazu entweder eines dünnen, kräftig gefärbten Turmalinkrystalls, welcher die dunklere Färbung und stärkere Absorption des Lichtes aufweist, wenn seine krystallographische Hauptachse zu der Schwingungsrichtung des Polarisators gekreuzt ist. Oder aber man verwendet dazu einen Glasplattensatz oder im einfachsten Fall irgend eine reflektierende Fläche. Das durch Reflexion polarisierte Licht schwingt senkrecht zu der Einfallsebene; wenn man also eine solche reflektierende Fläche im Polarisationswinkel durch ein Nicolsches Prisma betrachtet, so wird sie dunkel erscheinen, sobald die Schwingungsrichtung des Nicols der Einfallsebene parallel ist.

Hierauf mufs die genaue Justierung beider Nicols geprüft werden. Soll das Mikroskop zu irgend welchen Messungen im polarisierten Licht tauglich sein, so mufs, so genau als irgend möglich, die Schwingungsrichtung je eines der beiden Nicols parallel zu je einem Faden des Fadenkreuzes sein, welche wiederum

genau senkrecht aufeinander stehen müssen. Man konstatiert dies am besten mit Hilfe eines in Kanadabalsam eingekitteten nadelförmigen Krystalls mit gerader Auslöschung, welcher völlig farblos ist und eine der Lichtbrechung des Kanadabalsams möglichst nahestehende Lichtbrechung aufweist. Besonders deutlich ist die Reaktion, wenn der Krystall zwischen gekreuzten Nicols die intensiven Polarisationsfarben der niedern Farbenordnungen aufweist. In hervorragendem Mafse brauchbar zu diesem Zweck sind lange, ca. 0,1—0,15 *mm* dicke Krystalle von Quarz; weniger geeignet sind Spaltblättchen von Anhydrit etc., welche aber leichter beschafft werden können. Legt man nun eine lange Kante des betreffenden in Kanadabalsam eingebetteten Krystalls parallel zu einem der beiden Fäden, so wird, wenn die Schwingungsrichtung des Polarisators genau dieselbe Richtung hat, das Licht unverändert auch den Krystall passieren, d. h. der Quarzkrystall, welcher eine dem Kanadabalsam sehr ähnliche Lichtbrechung hat, ist bei gekreuzten Nicols völlig unsichtbar und bleibt unsichtbar bei einer Drehung des Analysators um 90°. Tritt dagegen bei dieser Drehung nur eine geringe Aufhellung oder Färbung des Quarzkrystalls hervor, so ist dies ein Anzeichen dafür, dafs die Schwingungsrichtung des Polarisators nicht genau mit der Richtung des Fadens zusammenfällt, und man korrigiert nun durch Drehen des Polarisators, bis eine solche Farbenerscheinung nicht mehr zu bemerken ist. In derselben Weise kontrolliert man dann den Analysator, wobei nach genauer Markierung der richtigen Stellung des Polarisators dieser als beweglicher Nicol gehandhabt wird. Sodann stellt man den Quarzkrystall parallel zu dem zweiten Faden, versucht, ob er auch dann keine Farbenreaktion hervorbringt, und hat, wenn dies der Fall ist, den sichersten Beweis dafür, dafs die Schwingungsrichtung je eines der beiden Nicolschen Prismen zu je einem der beiden Fäden parallel ist, und dafs aufserdem die beiden Fäden genau 90° miteinander bilden.

In zahlreichen Fällen wird es unmöglich sein, eine Stellung der Nicolschen Prismen zu finden, in welcher ein vollständiges Verschwinden des Krystalls eintritt, da sehr häufig optische Störungen in den Linsen vorhanden sind, und da aufserdem, namentlich bei den stärkeren Systemen, durch Brechung partielle Polarisation eintritt oder durch die Spannung der Metallfassung, speziell bei raschem Temperaturwechsel, die Linsen ein geringes Mafs von Doppelbrechung angenommen haben. Ist in letzterem Fall die Spannung nicht zu stark, so ergiebt sich ein [illegible]rmaler Gleichgewichtszustand nach einiger Zeit von selbst; ist aber die E[illegible] auf d[illegible]ierte Licht sehr deutlich,

so wird ein solches Linsensystem manche Unannehmlichkeit und Ungenauigkeit beim Arbeiten zur Folge haben. Zu bemerken ist noch, dafs die optischen Störungen, wenn sie bei der Einstellung des Polarisators sich geltend machen, dem Beleuchtungssystem, im andern Falle dem Objektiv angehören. Da die Nicolschen Prismen im allgemeinen zwischen Kork gefafst sind, welcher bei Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft, der Temperatur, sowie schliefslich von selbst durch allmähliches Austrocknen stark sein Volumen ändert, so wird man die Kontrolle der Orientierung der Nicolschen Prismen öfters wiederholen müssen, und vor allem ist sie jedesmal anzuraten, bevor man eine besonders genaue Messung der Schwingungsrichtungen eines Krystalls ausführen will.

Die Beobachtungen im gewöhnlichen Licht.

Als gewöhnliches Licht bezeichnet man das nicht polarisierte. Die hier in Frage kommenden Beobachtungen können daher ohne Anwendung der Nicolschen Prismen ausgeführt werden. Im gewöhnlichen Licht kann man folgende Eigenschaften studieren:

1. die Lichtbrechung;
2. Form und Spaltbarkeit;
3. Gröfse und Dicke des Objekts;
4. die Einschlüsse;
5. die Farbe;
6. die Erscheinungen im reflektierten Licht.

1. Die Beobachtung der Lichtbrechung.

Die erste und wichtigste Beobachtung, welche wir bei der einfachsten Zusammenstellung des Mikroskops zu machen im stande sind, ist diejenige der Lichtbrechung.

Ein Lichtstrahl, welcher in schiefer Richtung aus einem Medium in ein anderes übergeht, wird aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt, er wird gebrochen, da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in verschiedenen Medien im allgemeinen verschieden ist. Es gilt dabei das Gesetz $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}$ (Fig. 23), wobei i der Winkel des einfallenden Strahls gegen das Einfallslot, r derjenige des gebrochenen ist, während v und v' die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes in den beiden Medien darstellen. Aus dieser Formel folgt, dafs der Lichtstrahl beim Übergang aus einem Medium mit gröfserer Fortpflanzungsgeschwin-

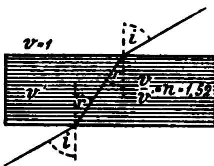


Fig. 23.
Brechung des Lichtes.

digkeit (v) in ein solches mit geringerer (v') dem Einfallslot zugebrochen wird, da dann $r < i$ ist. Setzt man in obiger Gleichung für das erste Medium die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft $v = 1$, so ergiebt sich der Brechungsexponent n des zweiten Mediums bezogen auf Luft $n = \frac{1}{v'}, = \frac{\sin i}{\sin r}$, oder Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Lichtbrechung stehen in reziprokem Verhältnis. Tritt der Lichtstrahl umgekehrt aus einem Medium mit geringerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit (v') in dasjenige mit gröſserer (v) über, so wird der Winkel des gebrochenen Strahls mit dem Einfallslot gröſser sein als der des einfallenden: der Strahl wird vom Einfallslot weggebrochen. Für einen bestimmten Einfallswinkel i wird dann $r = 90^0$ sein, d. h. das unter diesem oder einem noch gröſseren Winkel auf die Grenze auftreffende Licht dringt in den zweiten Körper nicht mehr ein, es wird totalreflektiert. Der Einfallswinkel i, für welchen $v = 90^0$ ist, heiſst der Grenzwinkel der Totalreflexion; derselbe ist um so kleiner, je gröſser der Unterschied der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den beiden Medien ist, z. B. für Glas ($n = 1{,}5$) $40^0\,45'$, für Diamant ($n = 2{,}4$) $23^0\,45'$ an der Grenze gegen Luft.

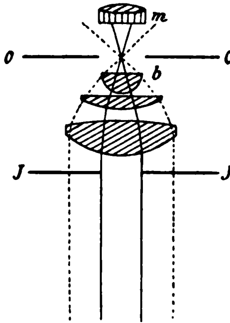
Fällt endlich ein Strahl senkrecht auf die Grenze zweier verschiedener Medien, so ist $\sin i = 0$, infolge dessen muſs auch $\sin r = 0$ sein, d. h. senkrecht auffallendes Licht wird im normalen Falle keine Ablenkung erfahren. Beobachtet man freiliegende Krystalle mittels des Mikroskops, so werden nur diejenigen Teile derselben durchsichtig erscheinen, welche von glatten parallelen Flächen begrenzt sind, die wenigstens annähernd senkrecht zur Achse des Mikroskops liegen, denn nur in diesem Falle erleiden die durchgehenden Strahlen keine oder nur sehr geringe Ablenkung; ist die Neigung der Flächen dagegen bedeutend, so tritt an der Grenze zwischen Krystall und Luft Totalreflexion des Lichtes ein: solche Partien erscheinen dann dunkel. Sind die Flächen der Krystalle uneben, oder handelt es sich um nicht polierte Platten von Krystallen, wie sie z. B. die Dünnschliffe darstellen, so werden dieselben mehr oder minder getrübt erscheinen, d[illegible] der Uneb[illegible] der Begrenzungsflächen nur ein geringer [illegible] derselb[illegible] ungebrochen hindurchläſst, während [illegible] ungen und Erhöhungen infolge ihre[illegible] Lage [illegible] Quer[illegible] eines Dünn-

schliffs S. 7) an zahlreichen Stellen eine Totalreflexion des Lichtes hervorbringen.

Legt man ein von rauhen Flächen begrenztes Präparat in einen Tropfen Wasser ($n = 1,333$) und deckt dasselbe mit einem sogen. Deckglas zu, so wird zwar im allgemeinen die Rauheit des Aussehens nicht verschwinden, die Durchsichtigkeit aber um vieles erhöht werden, da jetzt der Unterschied in der Lichtbrechung zwischen dem Krystall und dem ihn umgebenden Medium geringer, der Grenzwinkel der Totalreflexion daher gröſser ist. Nimmt man eine Flüssigkeit mit höherer Lichtbrechung, so wird man das rauhe Aussehen um so mehr verschwinden sehen, je näher sich die Lichtbrechung der Flüssigkeit und diejenige der untersuchten Substanz stehen. Bei vollständig gleicher Lichtbrechung beider Medien erscheint die Platte wie poliert, die unebenen Flächen vollständig eben, und wenn man Flüssigkeiten von noch höherer Lichtbrechung verwendet, tritt mehr und mehr wieder die Unebenheit der Oberfläche hervor. Auch die Umgrenzung des Krystalls, seine Umrisse, welche in unbedecktem Zustand kräftig hervortreten, verschwinden um so mehr, je näher der Brechungsexponent der umhüllenden Flüssigkeit demjenigen des Krystalls kommt, bis dieselben bei vollständiger Übereinstimmung ganz unsichtbar sind — vorausgesetzt daſs der Krystall farblos ist —, um bei Anwendung noch stärker lichtbrechender Flüssigkeiten wieder hervorzutreten.

Eine exakte Beobachtung dieser Unterschiede der Lichtbrechung ist allerdings nur dann möglich, wenn ausschlieſslich Strahlen von einer bestimmten Richtung vorhanden sind, d. h. im parallelen Licht. Weisen dagegen die Strahlen, welche ein Präparat durchsetzen, gegeneinander eine bedeutende Konvergenz auf, so werden auch auf jedes Flächenelement der unebenen Begrenzung Strahlen von sehr verschiedener Richtung einwirken. Es gehen dann an allen Teilen des Präparates einzelne Teile des Strahlenbündels hindurch, und die ungleiche Beleuchtung und infolgedessen das rauhe Aussehen der Oberfläche treten viel weniger hervor. Da in diesen durch die Lichtbrechung bedingten Verhältnissen eines der wichtigsten Hilfsmittel bei der mikroskopischen Bestimmung gegeben ist, pflegt man die Dünnschliffe nicht zu polieren, und man wird, um diese Unterschiede möglichst deutlich hervortreten zu lassen, stets die Beobachtung in annähernd parallelem Lichte beginnen.

Der Beleuchtungsapparat des Mikroskops liefert an sich mehr oder minder konvergente Lichtstrahlen, man mufs zur Beobachtung der Lichtbrechung aus denselben möglichst genau parallele Strahlenbündel isolieren. Die Einengung des Beleuchtungskegels wird entweder durch eine unterhalb des Beleuchtungsapparates befindliche Irisblende (*J* in Fig. 24) erreicht, durch welche diejenigen Lichtstrahlen abgeblendet werden, welche die äufseren Ränder der Linsen durchsetzen, während durch den mittleren Teil des Beleuchtungsapparates Licht hindurchgeht, das, wie Fig. 24 zeigt, nur sehr wenig konvergent ist.



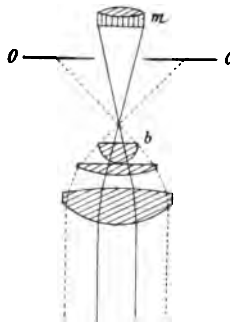


Fig. 24. Fig. 25.
Einengung des Beleuchtungskegels
durch Irisblende. durch Senken des Beleuchtungsapparates.

Dieser im allgemeinen für unentbehrlich gehaltene Apparat kann in seiner vollen Wirkungsweise ersetzt werden durch eine vertikale Verschiebung des ganzen Beleuchtungsapparates, wie dies Fig. 25 erkennen läfst. Wenn man den Beleuchtungsapparat in seiner Fassung versenkt, so werden die äufseren Teile des Strahlenbündels von dieser aufgenommen, und nur wenig in ihrer Richtung voneinander abweichende Strahlen durchsetzen das Präparat. Für beide Methoden erscheint es zweckmäfsig, ein möglichst starkes Beleuchtungssystem zu verwenden. Wem also kein Mikroskop mit einem Abbeschen Beleuchtungsapparat zur Verfügung steht, der wird, im Gegensatz zu den gewöhnlich gegebenen Vorschriften, zu all diesen Untersuchungen den Kondensor einschieben, soweit nicht die Ausdehnung des Sehfeldes selbst dadurch beschränkt wird; dies ist aber nur bei den allerschwächsten Objektiven der Fall. Es werden daher zweckmäfsig alle Beobachtungen im Mikroskop bei eingelegtem Kondensor ausgeführt, den man nur dann entfernt, wenn man zu den schwächsten Vergröfserungen übergeht.

In einzelnen Fällen, wo es sich um besonders geringe Unterschiede der Lichtbrechung handelt, wird die schiefe Beleuchtung mit Nutzen an-

gewandt, welche man am einfachsten durch Schiefstellung des Spiegels erreicht, wobei das Licht nur den Rand des Beleuchtungsapparates trifft, oder indem man zu demselben Zweck die Irisblende horizontal verschiebbar macht. Eine derartige Vorrichtung wird aber infolge der dadurch hervorgerufenen Komplikation des Instrumentes an Polarisationsmikroskopen kaum je angebracht.

Auch durch sogen. Zentrumsblenden, welche unterhalb des Beleuchtungsapparates eingelegt werden können, lassen sich die Unterschiede der Lichtbrechung sehr kräftig hervorheben, indem dadurch die mittleren Strahlen abgeblendet werden und nur die stark schief auffallenden Randstrahlen des Beleuchtungsapparates das Präparat treffen; doch müssen die Zentrumsblenden auf den Öffnungswinkel des jeweilig zur Verwendung kommenden Objektivs abgestuft sein.

Ein sehr einfacher Apparat für die Erkennung der feinsten Unterschiede der Lichtbrechung liegt in dem sogen. Mikrorefraktometer vor, einer mit runder, zentraler Durchbohrung versehenen Kappe, die auf das Okular aufgesetzt wird und an welcher durch einen von einer Seite her beweglichen Schieber die runde Öffnung nach und nach verschlossen werden kann.

In zahlreichen Fällen kann die besprochene Methode zu einer ziemlich genauen Bestimmung der Lichtbrechung der zu untersuchenden Krystalle verwendet werden. Zu diesem Zwecke stellt man sich eine Reihe von Flüssigkeiten, sogen. Indikatoren, zusammen, welche eine allmähliche Zunahme der Lichtbrechung in Intervallen von 0,01—0,02 aufweisen, am einfachsten eine Reihe verschieden konzentrierter Lösungen von Kaliumquecksilberjodid in Wasser (Thouletsche Lösung), da man bei dieser Lösung nach nebenstehender Tabelle die Möglichkeit besitzt, die Lichtbrechung in einer für die hier meist in Betracht kommenden Verhältnisse ausreichenden Weise aus dem spezifischen Gewichte zu berechnen, welch letzteres jederzeit mittels der Westphalschen Wage ermittelt werden kann. Es läfst sich so jede Abstufung zwischen $n = 1,33$ und $n = 1,73$ herstellen. Man legt das zu untersuchende Objekt nacheinander in die verschiedenen Lösungen und beobachtet, womöglich in monochromatischem Lichte, bei welcher Verdünnung das Krystall völlig unsichtbar geworden ist.

Tabelle der Brechungsexponenten der Kaliumquecksilberjodidlösung.

S	*n D*	*n r*
3,2	1,733	0,0003156
3,1	1,715	0,0002919
3,0	1,696	2858
2,9	1,677	2795
2,8	1,658	2734
2,7	1,640	2675
2,6	1,621	2617
2,5	1,602	2557
2,4	1,583	2470
2,3	1,565	2383
2,2	1,546	2302
2,1	1,527	2219
2,0	1,509	2139
1,9	1,491	2060
1,8	1,473	1984
1,7	1,455	1907
1,6	1,437	1833
1,5	1,419	1759

S = spezif. Gew.; *n D* Brechungsexponent für die *D*-Linie; *n r* = Änderungskoëffizient desselben für 1° C.

Eine genauere Methode der Bestimmung der Brechungsexponenten mikroskopischer Objekte wurde von C. Klein in Vorschlag gebracht, durch eine Verbindung des Abbeschen Totalreflektometers mit dem Mikroskop. Es können nach dieser Methode alle Brechungsexponenten an

einem beliebig orientierten mikroskopischen Durchschnitt eines Minerals bestimmt werden, zu welchem Zweck der den betreffenden Durchschnitt umgebende Teil des Präparates mit schwarzem Lack abgeblendet werden mufs. Selbst bei verhältnismäfsig kleinen Individuen erhält man so noch recht gute Resultate. Die Methoden der Einstellung und Beobachtung sind dieselben wie an dem Abbeschen Totalreflektometer selbst; es soll daher hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Hervorgehoben soll nur werden, dafs der Fufs, welcher die Halbkugel des Abbeschen Apparates trägt, durchbohrt, die Halbkugel selbst über der Durchbohrung plan abgeschliffen ist, um die zur Untersuchung gelangenden Präparate mittelst des Mikroskops im durchfallenden, gewöhnlichen oder polarisierten Licht untersuchen zu können. Doch hat sich dieser verhältnismäfsig komplizierte Apparat, welcher mit bedeutenden Kosten verbunden ist, wenig Eingang verschafft.

Etwas einfacher und, wie es scheint, sehr günstig in den erhaltenen Resultaten ist das in neuerer Zeit von Wallerant konstruierte Totalreflektometer, welches an jedem Mikroskop angebracht werden kann. Es besteht aus einem Aufsatz auf dem Objekttisch, welcher ein Prisma von stark brechendem Glas trägt, das parallel zu seiner brechenden Kante sowohl in Verbindung mit einer Alhidade (Ablesung bis 2′) als auch für sich allein um eine horizontale Achse gedreht werden kann. Die Kante selbst ist parallel zu der Basis des Prismas abgeschliffen, damit man mittels des Mikroskops durch den ganzen Apparat hindurchblicken kann. Der möglichst fein polierte Dünnschliff wird (natürlich unbedeckt) unter Zuhilfenahme eines Tropfens Methylenjodid mit zwei Klammern auf der Basis des Prismas festgedrückt und seine Auslöschungsrichtung im durchfallenden Lichte bestimmt. Nun dreht man das Prisma so weit, bis das durch eine Seitenfläche einfallende, durch eine Linse konvergent gemachte Licht eines Auerbrenners, von dem Mineral reflektiert, durch die zweite Seitenfläche des Prismas austretend, in die Achse des Mikroskops kommt. Hierauf zentriert man das Objekt möglichst genau, stellt nach der vorher gemachten Auslöschungsbestimmung die Schwingungsrichtungen des Krystalls ein und dreht, bis die Verteilung von Licht und Schatten den Grenzwinkel der Totalreflexion anzeigt. Darauf zieht man eine im Tubus befindliche Irisblende so weit zu, dafs nur noch der zu untersuchende Durchschnitt sichtbar ist, und vertauscht das Okular mit einem Fernrohr, welches einen Abbeschen Kompensator trägt, der die gelben Strahlen aus dem weifsen Licht isoliert. Jetzt stellt man die Grenzen der Totalreflexion mittels eines im Fernrohr angebrachten Fadenkreuzes ein und liest ab. Hierauf beleuchtet man dieses letztere durch seitwärts einfallendes Licht mittels eines total reflektierenden Prismas. Man dreht nun das den Schliff tragende Prisma mit der Alhidade so lange, bis das von dessen Basis reflektierte Bild des Fadenkreuzes mit diesem selbst zusammenfällt. Hierauf macht man die zweite Ablesung und findet so den Winkel der totalen Reflexion.

Die sogen. „Aufhellungsflüssigkeiten“, welche in der organischen Mikroskopie so vielfach angewandt werden, gehen gleichfalls von dem Prinzip der Kompensation der Lichtbrechung aus. Die Präparate von Krystallen und Gesteinen werden im allgemeinen in Kanadabalsam eingebettet, dessen Lichtbrechung je nach der Verdünnung zwischen 1,53 bis

1,545 schwanken kann, und der in den meisten Fällen die Vergleichsflüssigkeit abgiebt. Der Kanadabalsam eignet sich hierzu besonders deshalb, weil er, in frischem Zustand leichtflüssig, durch leichtes Erwärmen in einen klar durchsichtigen, fast farblosen, fest haftenden Kitt übergeführt wird, welcher nicht (oder wenigstens nur in sehr geringem Maſse), wie dies bei andern Harzen gewöhnlich der Fall ist, beim Erkalten doppelbrechend wird. Auch Lösungen von verhärtetem Kanadabalsam in Benzol, Xylol u. s. w. werden gern angewandt, zumal wenn es sich um Substanzen handelt, welche man nicht erwärmen darf. Die Lichtbrechung ist dann entsprechend der Verdünnung etwas geringer. Ein Nachteil für den Chemiker ist die auſserordentlich groſse Lösungsfähigkeit des Kanadabalsams (welche unter Umständen durch Zusatz von Benzol u. s. w. erhöht wird) nicht nur für organische Verbindungen, sondern auch für zahlreiche anorganische Salze.

Wenn es sich nicht um sogen. Dauerpräparate handelt, sondern nur um den Bedarf des Augenblicks, so wird man an Stelle des immerhin etwas unbequemen Kanadabalsams andere Flüssigkeiten verwenden, so im einfachsten Fall das Wasser: n (Lichtbrechung) $= 1{,}33$, dann Glycerin: $n = 1{,}47$, Zedernöl: $n = 1{,}52$, für sehr stark lichtbrechende Substanzen Anilin: $n = 1{,}59$, Monobromnaphthalin: $n = 1{,}66$, Methylenjodid: $n = 1{,}74$, oder konzentrierte Lösungen von Kaliumquecksilberjodid: $n = 1{,}73$ und Baryumquecksilberjodid: $n = 1{,}78$.

Da das völlige Verschwinden eines Krystalls in einer Flüssigkeit nur dann zu beobachten ist, wenn die Brechungsexponenten beider sehr annähernd gleich sind, bei gröſserer oder geringerer Lichtbrechung aber der Krystall in gleicher Weise von der Umgebung sich abhebt, wird man zunächst im Zweifel sein, ob das Hervortreten desselben der einen oder der andern Ursache zuzuschreiben ist. Die Entscheidung ist indes sehr einfach: man engt bei der mikroskopischen Beobachtung den Beleuchtungskegel so stark ein, daſs die Grenze des Krystalls gegen die Flüssigkeit oder im Dünnschliff die Grenze zweier Krystalle als scharfe Linie erscheint, und hebt nun den Tubus mittels des Triebes in die Höhe. Es tritt dann ein deutlich erkennbarer Lichtschein parallel zu der Grenze der beiden verschieden lichtbrechenden Medien auf, welcher sich beim Heben des Tubus gegen die stärker lichtbrechende Substanz verschiebt, während das schwächer lichtbrechende Objekt dunkel umrandet erscheint. Beim Senken des Tubus sieht man infolge der Bildumdrehung die entgegengesetzte Erscheinung.

In Fig. 26 sind Krystalle von Baryumnitrat ($n = 1{,}57$) in Kanadabalsam bei gehobenem Tubus abgebildet: deutlich erkennbar ist das lichte Band innerhalb der Umgrenzung. Das Entgegengesetzte ist der Fall bei den in Fig. 27 abgebildeten Tetraëdern von essigsaurem Uranylnatrium, welche schwächer lichtbrechend sind als der umhüllende Kanadabalsam und daher

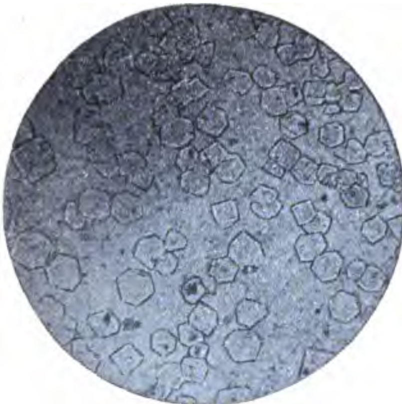


Fig. 26.
Stärker

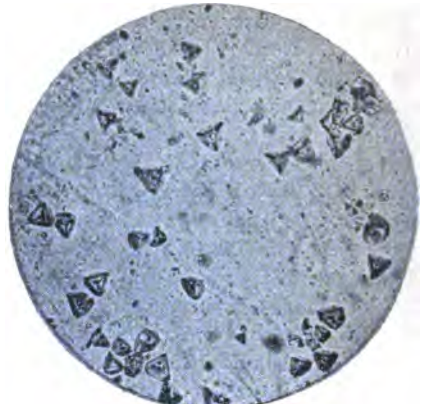


Fig. 27.
Schwächer

lichtbrechende Krystalle in Kanadabalsam bei gehobenem Tubus.

beim Heben des Tubus einen scharfen, hellen Rand aufserhalb, einen dunkeln innerhalb der Krystalle erkennen lassen.

Diese Erscheinung erklärt sich folgendermafsen. An der Grenze zweier verschieden stark lichtbrechender Substanzen (Fig. 28) werden sämtliche Strahlen, welche der Beleuchtungsapparat liefert, unter welchem Winkel sie auch auf die Grenze der beiden auffallen, aus der schwächer lichtbrechenden Substanz links in die stärker lichtbrechende rechts übersetzen. Umgekehrt aber wird nur ein Teil der Strahlen aus der stärker lichtbrechenden Substanz in die schwächer brechende hinübergehen, indem innerhalb eines bestimmten Winkels β Totalreflexion des Lichtes eintritt. Dieser Winkel aber ist ab-

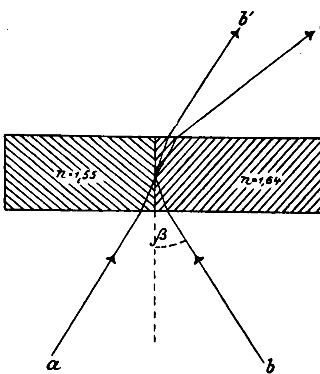


Fig. 28. Konstruktion zu Fig. 26 u. 27.

hängig von dem Verhältnis der Lichtbrechung der beiden Körper, und um so gröfser, je gröfser der Unterschied derselben ist. Engen wir nun den Beleuchtungskegel so weit ein, dafs nur noch Strahlen vorhanden sind, deren Schiefe innerhalb des Winkels β fällt, so ist klar, dafs die Grenze sich in der Weise darstellt, dafs auf seiten der stärker lichtbrechenden Substanz, wo sich das durch die Grenze hindurchgegangene zu dem total refl[illegible]n Lichte addiert, eine stark erhellte Zone, [illegible] andern [illegible] kein Licht hindurch-

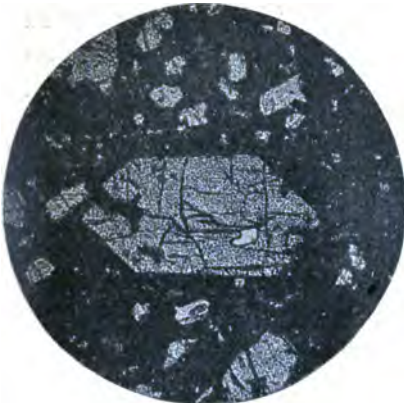




Fig. 29. Stark — Fig. 30. Mittel
lichtbrechendes Mineral in Kanadabalsam.

geht, eine ebenso kräftige Verdunklung eintritt. Hebt man den Tubus, so scheint diese Zone nach beiden Seiten breiter, es scheint somit, als ob die Erhellung gegen die stärker lichtbrechende Substanz fortschreiten würde.

Diese Erscheinung kann zu einer allerdings nur approximativen Bestimmung des Brechungsexponenten von Körpern verwendet werden, welche, wie dies bei den gewöhnlichen Dauerpräparaten der Fall ist, z. B. in Kanadabalsam eingebettet sind, ohne dafs es notwendig wäre, sie aus ihrer Umhüllung herauszunehmen. Da der Winkel β mit dem Unterschied der Lichtbrechung der beiden Körper proportional zunimmt, so wird man die Irisblende um so weiter zuziehen, bezw. den Beleuchtungsapparat um so tiefer senken müssen, um den Lichtschein deutlich zu erhalten, je mehr sich die beiden Brechungsexponenten einander nähern. Ist dann die Lichtbrechung des einen bekannt, also z. B. diejenige des Kanadabalsams, so giebt die Weite der Blendenöffnung, bezw. die Tiefe der Senkung des Be-



Fig. 31.
Schwach lichtbrechendes Mineral in Kanadabalsam.

leuchtungsapparates einen Maſsstab für die Lichtbrechung der zu untersuchenden Substanz ab. Die Unterschiede der Lichtbrechung zwischen dem zu beobachtenden Körper und dem umschlieſsenden Medium, welche durch diese Methoden der Beobachtung mittels annähernd paralleler Beleuchtung deutlich hervortreten, lassen, je gröſser sie sind desto besser, die Oberflächenbeschaffenheit und die Form der zu untersuchenden Gebilde erkennen; d. h. in den gewöhnlichen, in Kanadabalsam eingebetteten Dünnschliffen werden farblose Mineralien, deren Lichtbrechung sehr nahe an 1,54 liegt, wie z. B. der Quarz ($n = 1,55$; Fig. 29, S. 33), im gewöhnlichen Lichte kaum sichtbar sein, und die Grenze der Krystalle wird um so mehr reliefartig hervortreten, je weiter nach oben (Olivin $n = 1,68$; Fig. 30) oder unten (Hauyn $n = 1,48$; Fig. 31) die Brechungsexponenten sich von denjenigen des Kanadabalsams entfernen. Gleichzeitig beobachtet man, da die Oberfläche der Schliffe nicht fein poliert ist, die Rauheit derselben immer deutlicher.

Während man bei farblosen Mineralien, deren Lichtbrechung 1,54 nahesteht, diese Unebenheiten überhaupt kaum beobachten kann und der betreffende Durchschnitt auch bei paralleler Beleuchtung völlig klar durchsichtig erscheint, wird bei stärkerer oder schwächerer Lichtbrechung des Objektes eine Beobachtung bei völlig paralleler Beleuchtung die Beschaffenheit der Oberfläche mehr und mehr deutlich hervortreten lassen. Durchschnitte von Mineralien, deren Lichtbrechung stark von derjenigen des Kanadabalsams abweicht, haben dann ein rauhes, „chagrinöses“ Aussehen, welches, wie Fig. 29—31 zeigen, wiederum ein sehr wichtiges Mittel für die approximative Bestimmung der Lichtbrechung abgiebt. Sollen nicht Dünnschliffe, sondern isolierte Krystalle untersucht werden, so wird die Unebenheit der Flächen nur selten eine Rolle spielen; die Beobachtung der Krystallform aber ist im gewöhnlichen Licht nur dann gut ausführbar, wenn zwischen der Lichtbrechung des Krystalls und des umgebenden Mediums bedeutendere Unterschiede vorhanden sind, die sich in einem plastischen Hervortreten des Krystalls bei eingeengtem Beleuchtungskegel zu erkennen geben.

Betrachtet man z. B. einen isolierten Quarzkrystall, welcher in Kanadabalsam eingebettet ist, so wird man infolge der nahen Übereinstimmung der Lichtbrechung beider die Form im gewöhnlichen Lichte nicht oder doch wenigstens nur ganz undeutlich,

und auch das erst bei völlig eingeengtem Beleuchtungskegel erkennen. Legt man den Krystall aber in Wasser oder in Bromnaphthalin, so wird seine Form deutlich und schon bei viel weniger eingeengter Beleuchtung hervortreten.

2. Die Bestimmung von Form und Spaltbarkeit.

Um die Form von Krystallen noch plastischer hervortreten zu lassen, und besonders zur Untersuchung der meist sehr wenig tiefen Ätzfiguren eignen sich die stereoskopischen Mikroskope, welche die Objekte als Körper zu beobachten gestatten. Die Plastizität, welche zumal mit den neuen stereoskopischen Mikroskopen von Zeiss erreicht wird, erleichtert die Entzifferung mikroskopischer Krystalle in höchstem Maſse. Das in Fig. 32 abgebildete Modell dieser Firma nach dem Grenough-schen Prinzip hat infolge der bildumdrehenden Prismen im Tubus noch den Vorteil, das Bild des Krystalls in seiner wahren Lage zu geben. Die Beobachtung mittels zweier in die Achse der beiden Beobachtungsrohre gestellten Objektive macht allerdings die Verwendung starker Objektive unmöglich; allein auch sonstige Vorrichtungen zum stereoskopischen Sehen am Mikroskop, wie die Doppelokulare oder Stereoskopokulare, welche an dem einfachen Mikroskop angebracht werden, liefern nur bei Anwendung schwacher Systeme gute Resultate, ohne gleichzeitig die plastische Wirkung des binokularen Mikroskops zu erreichen. Indes ist die Wichtigkeit des



Fig. 32.
Binokularmikroskop nach Grenough, von C. Zeiss in Jena.

stereoskopischen Sehens doch auf eine geringe Anzahl von Fällen beschränkt, und das binokulare Mikroskop ist nicht im stande, im allgemeinen das Polarisationsmikroskop zu ersetzen.

Die Beobachtung der Form und deren möglichst genaue Skizzierung (vgl. die Methode der Krystallskizzierung am Schlusse dieses Buches) ist eine der zunächst folgenden Forderungen bei der mikroskopischen Krystallbestimmung. Man darf sich dabei aber nicht auf die Bestimmung der Umrisse beschränken, sondern mufs sich bemühen, die körperliche Beschaffenheit des Krystalls möglichst gut zu entziffern. Ohne ein solches Eingehen in die Form wird man häufig zu durchaus falschen Schlüssen gelangen, da die Kantenwinkel infolge der unregelmäfsigen Lage eines Krystalls im Präparat häufig stark verzerrt erscheinen und so ein falsches Bild von seinen Symmetrieverhältnissen hervorbringen.

Mit der Bestimmung der Krystallform Hand in Hand wird die Messung charakteristischer Winkel gehen, wobei aber nur solche Winkel zu berücksichtigen sind, welche von Kanten gebildet werden, die genau in der Ebene des Objekttisches liegen, oder von Flächen, welche senkrecht zu dieser Richtung sind.

Man stellt zunächst einen Schenkel des zu untersuchenden Winkels parallel zu einem Faden des Fadenkreuzes und liest an der Marke des drehbaren Objekttisches die Zahl der Grade ab, dreht dann, bis die andere Kante demselben Faden parallel ist, und hat nach wiederholter Ablesung in der Differenz die Gröfse des gesuchten Winkels. Die Parallelstellung einer Kante wird sich natürlich um so vollkommener ausführen lassen, je länger und gerader die Kante selbst und je aplanatischer das Beobachtungssystem des Mikroskops ist; auch erscheint es besser, bei einer solchen Messung die Kante nicht genau mit dem Faden zur Koïnzidenz zu bringen, sondern einen kleinen Zwischenraum zwischen Kante und Faden zu lassen, da so eine Parallelstellung viel exakter ausgeführt werden kann. Doch wird selbst in den günstigsten Fällen eine Ablesung ganzer und eine Schätzung von Viertelsgraden bei der Unvollkommenheit der Einstellung vollkommen genügen.

Zur genauen Messung der ebenen Winkel, namentlich sehr kleiner Krystalle benutzt man mit Vorteil das Leesonsche Prisma, ein achromatisches Quarzprisma, welches auf das Okular aufgesetzt wird und das in einer geteilten Fassung drehbar ist. Durch dasselbe sieht man zwei sich teilweise überlagernde Bilder des Objektes (Fig. 33). Man dreht zunächst das Prisma, bis die eine Kante des zu messenden Winkels in beiden Bildern in eine Gerade fällt (Fig. 33b), liest auf der Teilung des Prismas ab und verfährt mit der andern Kante ebenso (Fig. 33c). Gleichfalls genauere Resultate als mit dem einfachen Fadenkreuz erhält man, wenn man an dessen

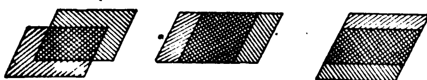


Fig. 33a. Fig. 33b. Fig. 33c.
Winkelmessung mit Leesons Prisma.

Stelle in die Brennebene des Okulars ein Glasplättchen einsetzt, das ein System feiner paralleler Linien eingeritzt trägt, welche in der Mitte von einer dazu senkrechten Linie geschnitten werden. Der Mittelstrich des Systems paralleler Linien ist etwas hervorgehoben, so dafs man das Objekt leicht centrieren kann, und nun bringt man die zu messenden Kanten nacheinander in Parallelstellung zu dem Strichsystem.

Endlich ist hier das Okulargoniometer zu erwähnen, ein Okular, in welchem der eine Faden des Fadenkreuzes gegen den andern gedreht werden kann; den Betrag der Drehung liest man auf einer Kreisteilung ab. Man stellt den beweglichen Faden nacheinander parallel zu den Schenkeln des zu messenden Winkels und hat dabei den Vorteil, dafs man das Präparat nicht zu bewegen braucht. An den Instrumenten mit gleichzeitig drehbaren Nicols bewegt sich mit der Umdrehung dieser auch das Fadenkreuz gegen das Objekt, so dafs man hier die Vorteile des Okulargoniometers an und für sich hat.

Auch eigentliche reflexions-goniometrische Messungen lassen sich mittels des Mikroskops ausführen, wenn man entweder die im Anhang zu besprechenden Drehapparate oder ein kleines Reflexionsgoniometer mit demselben in Verbindung bringt. Doch führen diese mikroskopisch-goniometrischen Messungen nur bei ziemlicher Übung zu guten Resultaten. Will man bei solchen Untersuchungen das Mikroskop selbst zur Beobachtung der Reflexe der Flächen benutzen, so bedient man sich zweckmäfsig der Gaufsschen Spiegelvorrichtung. Dieselbe besteht aus einem schief auf das Okular aufsetzbaren schwarzen Spiegel und einem unter dem Objektiv befindlichen geschwärzten Strichkreuz. Nachdem man dann die Fläche annähernd senkrecht zur Achse des Mikroskops gestellt hat, senkt man den Tubus um die Hälfte des Fokalabstandes des Objektivs und beobachtet das Spiegelbild des Strichkreuzes im Okular. Wenn die Fläche genau eingestellt ist, deckt sich dieses mit dem Fadenkreuz. Indes kann diese Vorrichtung nur in Verbindung mit den schwächsten Objektiven gebraucht werden.

Die Form der Krystalle, welche im Mikroskop untersucht werden, ist sehr häufig, zumal bei rasch erhaltenen Krystallisationen, in der mannigfaltigsten Weise verzerrt, so dafs infolge der ungleichmäfsigen Ausbildung gleichwertiger Flächen das Bild des Krystalls nur schwer zu entziffern ist. Da aber in solchen Fällen stets die Kantenwinkel konstant sind, hat man in der Messung derselben ein Hilfsmittel an der Hand, die zusammengehörigen Flächen zu finden und die Symmetrie eines solchen Krystalls zu erkennen. Fig. 34 stellt den Durchschnitt eines verzerrten Krystalls dar, welcher auf den ersten Anblick ganz unsymmetrisch erscheint. Eine Messung der ebenen Winkel zeigt, dafs $\measuredangle\, b\, c$ und $b'\, c'$ gleich ungefähr 90^{0} sind, während die übrigen vier Winkel wieder unter sich gleich sind; man hat es also vermutlich mit einem rhombischen Krystall zu thun, an welchem die Flächen des Prismas $b\, c$, $b'\, c'$ in sehr verschiedener Gröfse zur Ausbildung gekommen sind.

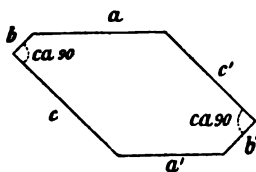


Fig. 34.

Rasche Krystallisation führt in zahlreichen Fällen zu einem lückenhaften Wachstum, wobei von mehr oder minder regelmäfsigen Formen begrenzte Ver-

tiefungen auf den Flächen der Krystalle auftreten, deren Wachstum an den Kanten rascher als inmitten der Flächen vor sich gegangen ist. Diese Unregelmäfsigkeiten leiten hinüber zu den Krystallskeletten, welche in den mannigfaltigsten und zierlichsten Formen ausgebildet sein können. Die sternförmigen Skelette des Schnees, die Eisblumen u. s. w. bilden die bekanntesten derartigen Wachstumsformen. Die Skelette führen endlich zu spiefsigen, haar-, stabförmigen etc. winzigsten Gebilden, deren Zugehörigkeit zu Krystallen nicht mehr sicher festgestellt werden kann, und die man als Krystalliten bezeichnet.

Die Mineralien, welche wir in den Dünnschliffen beobachten, zeigen sehr häufig mehr oder minder regelmäfsige Risse, welche auf eine Spaltbarkeit hinweisen. In manchen Fällen beobachtet man einzelne, scharf und gerade durch den ganzen Durchschnitt hindurchgehende Risse: die Spaltbarkeit ist vollkommen, selbst wenn die Zahl der Risse nur gering ist; oder die Risse sind absetzend: die Spaltbarkeit ist eine deutliche; oder aber es sind mehr oder minder krumme Sprünge, welche in der Hauptsache bestimmten Richtungen folgen: dann bezeichnet man die Spaltbarkeit als undeutlich. Es können dann wiederum verschiedene Systeme gleichwertiger oder verschiedenwertiger Spaltrichtungen vorhanden sein, die charakteristische Winkel einschliefsen, welche durch Messung bestimmt werden. Doch wird der Messung des Spaltungswinkels im Dünnschliff im allgemeinen eine viel gröfsere Wichtigkeit zugeschrieben, als ihr thatsächlich zukommt, da bei der beliebigen Orientierung, welche die einzelnen Durchschnitte besitzen, die Gröfse dieses Winkels in hohem Mafse von der Richtung abhängig ist, in welcher der Krystall getroffen wurde.

Auch die Untersuchung von Spaltstückchen gesteinsbildender Mineralien liefert öfters sehr charakteristische Resultate, so dafs sie manchmal zur raschen Orientierung oder aber auch zur Ergänzung der Beobachtungen im Dünnschliff sehr empfehlenswert ist.

Bei isolierten Krystallen beobachtet man Spaltrisse meist nur ganz vereinzelt und gewöhnlich auch nur dann, wenn die Spaltbarkeit sehr vollkommen ist; hin und wieder kann man durch Zerdrücken der Krystalle etc. Spaltstücke hervorbringen, und es bietet dann die Spaltungsgestalt ein viel charakteristischeres Kennzeichen für eine Substanz, als dies bei der Untersuchung von Dünnschliffen der Fall ist. Ähnlich den Spaltrissen können hin und wieder auch Risse nach den sogen. Gleitflächen in mikroskopischen Objekten hervortreten, und man hat kein Mittel, um beide Arten von Rissen voneinander zu unterscheiden.

3. Die Messung von Gröſse und Dicke.

Häufig ist es von Interesse, die Gröſse eines Objektes kennen zu lernen, die Bestimmung der Dicke kommt in noch zahlreicheren Fällen in Frage. Zu ersterem Zwecke dienen die Mikrometer, welche zum Teil am Objekttisch, zum Teil im Okular angebracht sind. Jene geben die Gröſse direkt, die von diesen erhaltenen Resultate müssen erst auf das betreffende Objektiv und die Tubuslänge umgerechnet werden. Dagegen werden andernteils die Fehler der Objektmikrometerteilung mit der ganzen Vergröſserung vervielfacht, während für die Okularmikrometer nur die Okularvergröſserung in Frage kommt.

Als Objektmikrometer dient in einigen Fällen die Einteilung des sogen. Kreuzschlittentisches, an dem eine Teilung der Trommeln der Schrauben noch $^1/_{1000}$ *mm* schätzen lassen sollte; geringe Fehler, wie sie beim Schneiden der Gewinde sich einstellen, machen diese Forderung natürlich illusorisch. Andernteils benutzt man auf den Objekttisch auflegbare Glasmikrometer, aber auch diese haben den Nachteil der groſsen Multiplikation ihrer Fehler. Es soll der Millimeter dabei in hundert Teile geteilt und die Teilstriche möglichst gleich sein.

Dagegen verlangt man von einem in das Okular einzulegenden Mikrometer nur eine Teilung in $^1/_{10}$ *mm*, die Anforderung an die Ausführung ist viel geringer, und Fehler fallen gleichfalls viel weniger ins Gewicht. Ein solches Okularmikrometer kann nun entweder einfach in die Brennebene des Okulars fest eingelegt werden, oder es kann so an demselben angebracht werden, daſs es mittels einer senkrecht zur Achse des Instrumentes wirkenden Schraube in der Brennebene des Okulars verschiebbar ist. In wieder andern Fällen ist die Skala selbst fest, und es verschiebt sich darüber ein an einer Meſstrommel bewegliches Ramsdensches Okular mit einem Indexstrich in seinem Brennpunkt; die Teilung, welche dieser Marke möglichst genähert sein muſs, ist auf der oberen ebenen Seite einer Linse angebracht, welche wiederum auf das Objektiv eingestellt ist, so daſs durch dieselbe die Exzentrizität des Okulars bei seiner Verschiebung aufgehoben wird.

Zur Bestimmung der Mengenverhältnisse der Mineralien im Dünnschliff kann man sich eines gleichfalls in das Okular einzulegenden Mikrometers bedienen, welches die in Fig. 17 (S. 19) dargestellte Einteilung besitzt.

Die Messung der Dicke eines mikroskopischen Objektes ist im allgemeinen nur möglich, wenn dessen optische Eigenschaften ziemlich genau bekannt sind; bei isolierten Krystallen wird man daher nur sehr selten zum Ziele kommen, etwas häufiger bei Dünnschliffen, in welchen fast stets einzelne Mineralien vorhanden sind, welche man kennt. Indes ist auch im günstigsten Falle die Messung der Dicke sehr wenig zuverlässig.

Eine besonders früher häufig gebrauchte Methode ist diejenige, welche der Herzog von Chaulnes zur Messung der Lichtbrechung vorgeschlagen hat, und die man umgekehrt auch zur Dickenmessung verwenden kann. Stellt man einen Punkt (o in Fig. 35) scharf ein und schiebt nun eine planparallele Platte einer durchsichtigen Substanz zwischen Objekt und Objektiv, so wird man, da durch diese die Strahlen $o\,r$ bezw. $o\,s$ abgelenkt werden, den Eindruck bekommen, als kämen sie von o' her. Man mufs daher das Objektiv mittels der Mikrometerschraube so weit heben, bis die Einstellung auf o' erreicht ist. Die Gröfse $o\,o'$ ist bei gleicher Dicke der Platte abhängig von dem Brechungsexponenten derselben; bei bekanntem Brechungsexponenten erhält man ein Mafs für ihre Dicke. Die Änderung des Fokalabstandes des Objektivs kann man an der geteilten Trommel der Mikrometerschraube ablesen; wir bezeichnen sie als d, die Dicke der Platte sei e, so ist der Brechungsexponent $n = \frac{e}{e-d}$, oder bei bekanntem Brechungsexponenten die Dicke $e = \frac{d}{1-\frac{1}{n}}$.

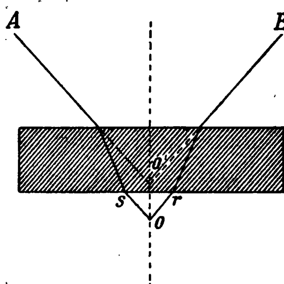


Fig. 35. Methode des Herzogs von Chaulnes.

Um nach dieser Methode die Dicke eines Dünnschliffs zu bestimmen, wählt man in demselben einen Durchschnitt, dessen Lichtbrechung bekannt ist. Man stellt nun bei sehr starker Vergröfserung zuerst die Oberfläche des Durchschnittes scharf ein und sucht dann unter demselben im Kanadabalsam liegende Staubpartikelchen u. s. w., die wohl nie fehlen, gleichfalls scharf einzustellen. Aus der Differenz der beiden Einstellungen ergiebt sich dann unter Zuhilfenahme des bekannten Brechungsindex des betreffenden Minerals nach obiger Formel direkt seine Dicke. Etwas zuverlässiger wird die Methode, wenn man an Stelle der Staubpartikelchen ein bestimmtes Signal anbringt, etwa ein feines Kreuzgitter, das man mit Wachs unterhalb des Polarisators festklebt. Man stellt dann zunächst auf das durch die Beleuchtungslinse gelieferte verkleinerte Bild dieses Signales ein und beobachtet nach Einschieben

des Objektes die durch dieses bewirkte Verschiebung des Bildes. Aber auch so giebt die Methode bei mikroskopischen Präparaten im höchsten Grade unzuverlässige Resultate, welche namentlich in den im Verhältnis zur Gesamtdicke des Präparates sehr erheblichen Fehlern der Einstellung gegeben sind, so dafs sie nur noch sehr wenig benutzt wird. Eine etwas genauere Methode, welche aber immer noch mit ziemlicher Unzulänglichkeit behaftet ist, beruht auf der Beobachtung der Interferenzfarben; sie wird in dem betreffenden Kapitel ausführlicher erörtert werden.

4. Die Beobachtung von Einschlüssen.

In einzelnen Fällen kann die Beobachtung von Einschlüssen von Wichtigkeit sein, da eine grofse Anzahl von krystallisierten Körpern, speziell auch von Mineralien, die Fähigkeit hat, grofse Mengen von fremden Substanzen bei der Krystallisation zu umschliefsen, oft in solchem Mafse, dafs der gröfste Teil eines Krystalls aus solchen Fremdkörpern besteht. Die Einschlüsse erkennt man im gewöhnlichen Licht an den Unterschieden der Lichtbrechung und der Färbung gegenüber dem umschliefsenden Krystall.

Es sind zum Teil krystallisierte Substanzen, welche in dieser Weise auftreten, und die nach den gewöhnlichen Methoden bestimmt werden müssen. Aufserdem trifft man Einschlüsse von Gasen, Flüssigkeit und Glas, die für die genetischen Verhältnisse häufig wichtige Anhaltspunkte gewähren. Da die Lichtbrechung der Gase sehr weit von derjenigen der festen Körper abweicht, erscheinen Gaseinschlüsse in krystallisierten Körpern stets stark hervortretend, bei paralleler Beleuchtung umgrenzt von einem einfachen, aber breiten, dunkeln, durch Totalreflexion hervorgebrachten Rand (Fig. 36); da ferner alle Gase mischbar sind, kann man in Gasblasen nie die Abtrennung verschiedener Zonen beobachten. Bei der Beobachtung von Gaseinschlüssen ist Vorsicht anzuwenden, ob es sich auch thatsächlich um eine Gasblase handelt, welche in dem Objekt selbst, und nicht im Kanadabalsam vorhanden ist.

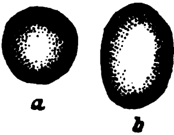
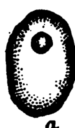


Fig. 36.
Gaseinschlüsse.

Im Gegensatz dazu erscheinen Flüssigkeits- und Glaseinschlüsse gewöhnlich in verschiedene Zonen abgetrennt. Von Flüssigkeiten kommt neben Salzlösungen und Wasser in einzelnen Mineralien namentlich auch flüssige Kohlensäure in Betracht, und es ist in allen Fällen neben der Flüssigkeit ein kleines Bläschen mit Gas oder Luft vorhanden, welches man als Libelle bezeichnet, die sich unter Umständen, namentlich in sehr kleinen Einschlüssen und bei Temperaturschwankungen, in äufserst lebhafter Bewegung befindet. Die Lichtbrechung der Flüssigkeiten steht wohl in allen in der Natur vorkommenden Fällen zwischen derjenigen des Minerals und derjenigen der Libelle, und man beobachtet, wie in Fig. 37, bei paralleler Beleuchtung beide Grenzen als kräftige Linien. Hin und wieder sieht man in einem Flüssigkeitseinschlufs mehrere verschieden lichtbrechende und nicht mischbare Flüssig-

keiten nebeneinander, oder es sind kleine Kryställchen in demselben enthalten. Ist die Flüssigkeit in einem solchen Einschlufs flüssige Kohlensäure, so konstatiert man dies am besten, wenn man das Präparat längere Zeit etwas über die kritische Temperatur der Kohlensäure erwärmt: es verschwindet dabei die Libelle, und der Rand des Einschlusses wird stärker.



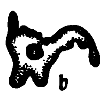


Fig. 37.
Flüssigkeitseinschlüsse.



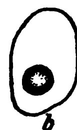


Fig. 38.
Glaseinschlüsse.

Die Glaseinschlüsse endlich, welche gleichfalls eine oder auch mehrere, stets aber unbewegliche Libellen enthalten, zeigen gegen den umschliefsenden Krystall, wenn dieser schwach lichtbrechend ist, keine kräftigen Konturen. Diese treten um so deutlicher hervor, je höher die Lichtbrechung des Krystalls steigt; die Libelle selbst ist dagegen stets von einem breiten, dunkeln Rand umgeben (Fig. 38). Auch eine gesetzmäfsige Anordnung der Einschlüsse ist in zahlreichen Fällen eine höchst charakteristische Erscheinung (Leucit).

5. Die Beobachtung der Farbe.

Eine weitere Beobachtung, welche man im gewöhnlichen Licht machen kann, ist die Beobachtung der Farbe. Nähere Angaben über die Benennung der Farben sind wohl kaum notwendig. Es mag nur darauf hingewiesen werden, dafs manche Körper, welche in gröfseren Krystallen sehr dunkel und völlig undurchsichtig sind, in dünnen Schichten farblos oder fast farblos erscheinen (Augit), während andere, die in makroskopischen Krystallen viel lichter gefärbt erscheinen, im dünnsten Schliff ihre Farbe noch deutlich erkennen lassen (Andalusit, Disthen). Dafs an sich von ein und derselben Substanz eine Schicht um so lichter gefärbt erscheint, je dünner sie ist, braucht nicht weiter betont zu werden. Für die Beobachtung von Farben wird man somit im allgemeinen nicht den dünnsten Schliff wählen.

Wenn Licht durch irgend einen Körper hindurchgeht, so erleidet es eine Schwächung seiner Intensität, es wird teilweise oder ganz absorbiert. Ist die Absorption nur gering und für die verschiedenen Farben des Spektrums annähernd gleich, so erscheint der betreffende Körper farblos und durchsichtig, ist sie aber selbst in der dünnsten Schicht vollkommen, so nennt man ihn undurchsichtig oder opak. Werden einzelne Farben des Spektrums in einem Körper stärker absorbiert als andere, so erscheint derselbe gefärbt. Man unterscheidet dann als Eigenfarbe diejenige Farbe, welche der Substanz des betreffenden

Körpers selbst zukommt, von einer diluten Färbung, welche durch fremde Beimengungen hervorgebracht ist, die aber in so feiner Verteilung vorhanden sind, dafs man sie selbst mit der stärksten Vergröfserung nicht entdeckt, während bei einer Färbung durch Einschlüsse die Ursache bei Betrachtung mit stärkerer Vergröfserung stets deutlich wird.

Wie schon früher bemerkt wurde, ist die chromatische Korrektur der achromatischen Objektive keine vollkommene; es giebt das häufig zu falschen Beobachtungen Anlafs, indem bei Beobachtung mit starken Objektiven kleine Körnchen, welche thatsächlich opak sind, violett oder grün gefärbt erscheinen. Das erstere ist der Fall, wenn das Objektiv etwas niederer, das letztere, wenn es etwas höher eingestellt ist; man bezeichnet die Erscheinung als Pseudochroïsmus.

6. Die Erscheinungen im reflektierten Licht.

Die Beobachtungen im reflektierten Licht beziehen sich auf die Oberflächenbeschaffenheit im allgemeinen, soweit sie im durchfallenden Licht nicht bestimmt werden konnte, so vor allem auf den Glanz der undurchsichtigen Substanzen (namentlich Metallglanz), auf Ätzfiguren u. s. w. Man blendet zu diesem Zwecke das von unten hereinkommende Licht ab und benutzt entweder das von aufsen unterhalb des Objektivs auf das Präparat auffallende Licht, oder man verstärkt dieses noch durch eingesetzte Sammellinsen oder durch Reflektoren.

Benutzt man das von oben auf das Präparat auffallende Licht, so ist ein nicht allzu geringer Abstand des Objektivs wünschenswert, da sonst die Fassung des Objektivs den gröfsten Teil des Lichtes abhält. Man wählt daher zu solchen Beobachtungen zweckmäfsig schwache Objektive, und wenn es auf starke Vergröfserungen ankommt, sehr starke Okulare.

Arbeitet man aber mit Objektiven von geringem Fokalabstand, so ist der oberhalb des Objektivs einzusetzende Vertikalilluminator, dessen Durchschnitt Fig. 39 giebt, zu verwenden. Derselbe besteht aus einem total reflektierenden Prisma K, mittels dessen das durch die Öffnung D eindringende Licht L durch das Objektiv O hindurch auf das Präparat geworfen wird. Das Prisma ragt über die Hälfte des Objektivs vor und läfst die andere zur Beobachtung frei, durch welche dann das vom Objekt reflektierte Licht das Auge erreicht. Zu bemerken ist, dafs bei Anwendung dieser Methode das Objekt nicht mit einem Deckglas gedeckt sein darf, da sonst der gröfste Teil des Lichtes schon vom Deckglas reflektiert wird, wie überhaupt bei Untersuchungen im reflektierten Licht am besten vollständig ungedeckte Präparate zur Verwendung kommen. Auch ist der Vertikalilluminator bei starken Objektiven infolge des grofsen Lichtverlustes nicht mehr verwendbar.

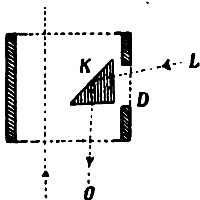


Fig. 39. Vertikalilluminator.

Die Beobachtungen im parallelen polarisierten Licht.

Von besonderer Wichtigkeit für die Untersuchung der krystallisierten Körper ist die Beobachtung derselben im polarisierten Licht, da man mittels desselben den inneren Aufbau eines Krystalls feststellen kann. Man fügt zu diesem Zweck zwischen die Beleuchtungsquelle und das zu untersuchende Objekt ein Nicolsches Prisma ein, den sogen. Polarisator, und beobachtet die Erscheinungen, welche ein Krystall in den verschiedenen Ebenen zeigt, in welchen das von dem Polarisator gelieferte, geradlinig polarisierte Licht durch denselben beim Drehen des Objekttisches um 360° nacheinander seine Schwingungen ausführt. Oder man wendet noch ein zweites Nicolsches Prisma an, welches oberhalb des Objektivs und im allgemeinen mit einer zu derjenigen des ersten genau gekreuzten Schwingungsebene angebracht wird, den Analysator, und beobachtet dann die Erscheinungen der Interferenz des Lichtes „zwischen gekreuzten Nicols". Bevor jedoch die Untersuchungen, welche man so ausführt, näher erörtert werden können, mufs eine kurze Übersicht über die optische Beschaffenheit der Krystalle vorausgeschickt werden.

Die optische Beschaffenheit der Krystalle.

Blickt man senkrecht durch Spaltungsstücke oder durch beliebig aus einem Krystall von Flufsspat oder Steinsalz herausgeschnittene planparallele Platten auf eine kleine, in einem dunklen Schirm befindliche erleuchtete Öffnung, so sieht man diese an derselben Stelle und in gleicher Weise, wie man sie auch ohne eine derartige Platte sieht. Hat man statt der planparallelen Platte ein Prisma aus der betreffenden Substanz und blickt durch zwei zu einander schiefe Flächen auf die Öffnung, so wird das Bild derselben zwar von der Stelle gerückt und farbig umrandet sein, aber man wird ebenfalls nur ein Bild der Öffnung sehen. So verhalten sich alle amorphen Körper und regulären Krystalle; man nennt dieselben daher **einfachbrechend.**

Hat man eine Reihe von solchen Prismen eines einfach brechenden Körpers und bestimmt aus der Ablenkung des Lichtes ihre Brechungsexponenten, so findet man in allen, sie mögen orientiert sein wie sie wollen, dieselbe Lichtbrechung. Einfach brechende Körper lenken somit in jeder Richtung das Licht in gleicher Weise

ab; man nennt sie daher auch optisch isotrop (gr. *isos* gleich, *tropein* ablenken). Da die Lichtbrechung im umgekehrten Verhältnis zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes steht, so folgt daraus, dafs in einem optisch isotropen Körper das Licht sich in allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt.

Nicht ebenso verhalten sich die Krystalle der übrigen Krystallsysteme. Nimmt man z. B. ein durchsichtiges Spaltungsstück von Kalkspat und betrachtet durch dieses die helle Öffnung, so erblickt man dieselbe doppelt. Das eine der beiden Bilder befindet sich an der wahren Stelle, das andere ist davon weggeschoben, und zwar je nach der Stellung des Kalkspats nach oben oder unten, nach rechts oder links. Dreht man den Kalkspat, während man durch denselben hindurchblickt, so dreht sich das letztere Bild um das erstere in einem Kreis herum, wobei stets zu beobachten ist, dafs die Verbindungslinie der beiden Bilder die Halbierende des stumpfen Winkels des Kalkspatspaltungsstückes ist. Den in dieser Richtung gelegten Durchschnitt durch den Kalkspat nennt man einen Hauptschnitt. Ähnlich verhalten sich alle nicht regulären Krystalle, und man nennt dieselben daher **doppelbrechend.**

Von den beiden durch Doppelbrechung hervorgebrachten Strahlen liefert der eine (ω in Fig. 40) ein Bild des Gegenstandes an seiner wahren Stelle, d. h. bei senkrechter Incidenz des Lichtes erleidet er keine Ablenkung; er folgt somit den gewöhnlichen Brechungsgesetzen, und man bezeichnet ihn als ordentlichen oder ordinären. Der andere (ε in Fig. 40) wird auch bei senkrechter Incidenz aus seiner Richtung abgelenkt; für ihn sind somit andere Brechungsgesetze mafsgebend, und man nennt ihn den aufserordentlichen oder extraordinären. Da ferner in allen Stellungen die Verbindungslinie der beiden Bilder ein sogen. Hauptschnitt ist, so ergiebt sich, dafs die Ablenkung des aufserordentlichen Strahles im Hauptschnitt erfolgt (Fig. 40).

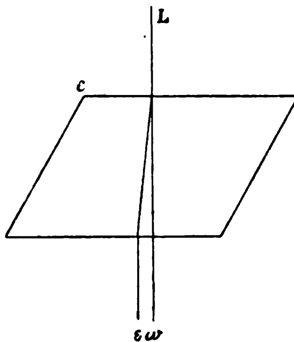


Fig. 40.
Zerlegung des Lichtes im Kalkspat.

Betrachtet man nun die beiden Bilder, welche man durch das Kalkspatspaltungsstück sieht (Fig. 41), durch ein zweites, ebenso dickes Spaltungsstück von Kalkspat, so findet man, dafs dieselben sich

durchaus anders verhalten, als wenn etwa zwei nebeneinander befindliche erleuchtete Öffnungen vorhanden wären. Wenn die beiden Spaltungsstücke genau parallel stehen, so erblickt man (Fig. 42) die beiden Bilder in der doppelten Entfernung, d. h. die Doppelbrechung des einen Spaltungsstückes addiert sich einfach zu der Doppelbrechung des andern. Sobald wir aber den einen Kalkspat drehen, ändert sich die Erscheinung, und man sieht im allgemeinen vier Bilder (Fig. 43). Die beiden vom Kalkspat gelieferten Strahlen sind nicht mehr gewöhnliches, sondern geradlinig polarisiertes Licht. Die Schwingungsebenen der beiden Strahlen sind stets zu einander senkrecht, und zwar schwingt der aufserordentliche Strahl ε stets in einem Hauptschnitt, der ordentliche *o* in einer zu diesem senkrechten Richtung, wie dies in Fig. 41—45 durch die Pfeile angedeutet ist.

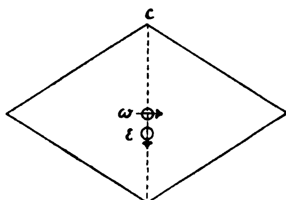


Fig. 41.
Doppelbrechung durch ein Kalkspatspaltungsstück.

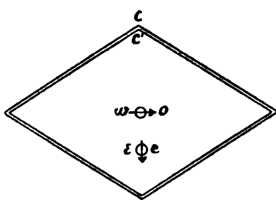
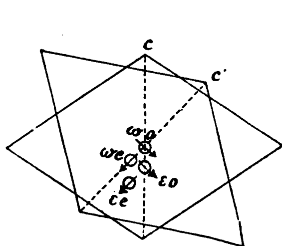
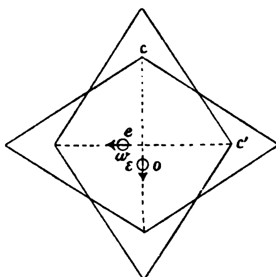


Fig. 42.
Doppelbrechung durch zwei parallele Kalkspatspaltungsstücke.





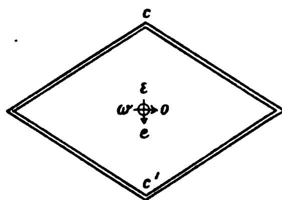


Fig. 43. Fig. 44. Fig. 45.
Doppelbrechung durch zwei Kalkspatspaltungsstücke nach einer Drehung um
45° 90° 180°.

Die Erscheinungen in Fig. 42 und 43 erklären sich nun sehr einfach. Das Licht, welches in Fig. 42 durch den ersten Kalkspat als aufserordentlicher Strahl ε hindurchgegangen ist, geht durch den zweiten zu diesem parallelen Kalkspat gleichfalls als aufserordentlicher Strahl *e* hindurch und erleidet in dem letzteren eine ebenso starke Ablenkung, und zwar nach derselben Seite wie im ersten, es wird also doppelt so weit abgelenkt. Der andere Strahl geht durch beide als ordentlicher Strahl ω und *o* hindurch

und wird nicht abgelenkt. Ist dagegen der zweite Kalkspat, wie in Fig. 43, gegen den ersten um 45° gedreht, so wird der ordentliche Strahl ω des ersten in dem zweiten in zwei Komponenten zerlegt, welche den beiden Schwingungsebenen des ordentlichen (o) und des aufserordentlichen Strahles (e) im zweiten Kalkspat entsprechen, und liefert somit wiederum zwei Bilder, von welchen das eine ωo durch das beide Kalkspäte als ordentlicher Strahl durchsetzende Licht entstanden ist und somit keine Ablenkung erfahren hat, das andere ωe der dem aufserordentlichen Strahl des zweiten entsprechenden Komponente seine Entstehung verdankt, also im Hauptschnitt des zweiten Kalkspates abgelenkt ist. Ganz ebenso entstehen durch den aufserordentlichen Strahl ε des ersten Kalkspates zwei Bilder εo und εe, welche Fig. 43 an entsprechender Stelle zeigt. In einer Stellung, bei welcher die beiden Hauptschnitte weniger als 45° miteinander einschliefsen, sind die beiden Bilder ωo und εe heller als die beiden andern, bei einer Drehung über 45° hinaus treten die letzteren auf Kosten der ersteren mehr und mehr hervor, bis bei einer Drehung um 90° die Verhältnisse in Fig. 44 eintreten, in welcher nur noch ωe und εo sichtbar sind. Wenn endlich die beiden Kalkspate 180° miteinander bilden, so ergiebt sich Fig. 45; der ordentliche Strahl des einen geht als ordentlicher durch den zweiten, ebenso der aufserordentliche als aufserordentlicher; der erstere wird überhaupt nicht abgelenkt, der letztere wird im ersten Kalkspat um denselben Betrag in der einen Richtung abgelenkt, um welchen in entgegengesetztem Sinne seine Ablenkung im zweiten geschieht, so dafs die Bilder sich vollständig decken.

Schneidet man aus einem Kalkspatkrystall eine Reihe verschieden orientierter Prismen, so sieht man durch dieselben im allgemeinen gleichfalls zwei Bilder der hellen Öffnung, welche aber je nach der Orientierung des betreffenden Prismas verschieden weit voneinander entfernt sind. Bestimmt man an diesen Prismen die Brechungsexponenten, so beobachtet man, dafs die Brechungsexponenten der beiden senkrecht zu einander polarisierten Strahlen verschieden sind, dafs dabei der Wert des stärker gebrochenen Strahles in allen Prismen derselbe bleibt, während der andere wechselnde Gröfse aufweist. Seinen kleinsten Wert erreicht der letztere in einem Prisma, dessen brechende Kante der krystallographischen Hauptachse parallel geht. Der Unterschied der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der beiden Strahlen ist somit dann am

gröfsten, wenn die Fortpflanzung des Lichtes senkrecht zur krystallographischen Hauptachse erfolgt. Dagegen giebt ein Prisma, dessen brechende Kante senkrecht zu dieser Richtung ist, und dessen Flächen gleiche Winkel mit der Basis einschliefsen, bei der Bestimmung der Brechungsexponenten nach der Methode der kleinsten Ablenkung nur einen einzigen Wert. In diesem Falle pflanzt sich aber das Licht parallel zur krystallographischen Hauptachse fort, und es folgt daraus, dafs für Licht, welches sich parallel zu dieser Richtung fortbewegt, der Kalkspat sich verhält wie ein einfach brechender Körper.

Man bezeichnet eine Fortpflanzungsrichtung in einem doppelbrechenden Krystall, in welcher das Licht keine Doppelbrechung erleidet, als eine optische Achse. Der Kalkspat und mit ihm alle hexagonalen und tetragonalen Krystalle besitzen nur eine einzige derartige Richtung, man nennt sie daher optisch einachsig. Derjenige der beiden Strahlen, welcher in allen Richtungen die gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit aufweist, ist der ordentliche Strahl; der andere, bei welchem die Lichtbrechung und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit abhängig ist von der Richtung, in welcher die Schwingungen des Lichtes stattfinden, der aufserordentliche. Nach zahlreichen Beobachtungen über die Schwingungsebenen der beiden senkrecht zu einander polarisierten Strahlen hat die Annahme einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit, dafs die Schwingungen des ordentlichen Strahles stets in einer Richtung senkrecht zur optischen Achse stattfinden, während diejenigen des aufserordentlichen in einer zu dieser Schwingungsrichtung senkrechten Ebene erfolgen, welche gleichzeitig durch die optische Achse geht, also in einem Hauptschnitt.

Es folgt daraus, dafs alle Schwingungsrichtungen senkrecht zur optischen Achse gleichwertig sind, da der stets senkrecht zu derselben schwingende ordentliche Strahl in allen Fällen gleiche Lichtbrechung aufweist. Dagegen zeigt ein parallel zur optischen Achse schwingender Strahl den gröfsten Unterschied von diesem, und in den dazwischen liegenden Schwingungsrichtungen nähert sich die Lichtbrechung um so mehr derjenigen des ordentlichen Strahles, je gröfser die Neigung der betreffenden Richtung zu der optischen Achse ist.

Den Brechungsexponenten des ordentlichen Strahles bezeichnet man mit ω, den von diesem am weitesten abweichenden des

senkrecht auf der Ebene der optischen Achsen steht, als optische Normale. Die optischen Achsen schliefsen einerseits einen spitzen, anderseits einen stumpfen Winkel ein; man nennt die Halbierende des spitzen die erste oder spitze, diejenige des stumpfen die zweite oder stumpfe Mittellinie oder Bisektrix; ist erstere die Richtung kleinster Lichtbrechung (α), so nennt man den Krystall negativ, im andern Fall positiv. Der Wert der mittleren Lichtbrechung kann für eine bestimmte Farbe das arithmetische Mittel aus den Werten der gröfsten und kleinsten Lichtbrechung sein, ist es aber gewöhnlich nicht. Er nähert sich demjenigen der zweiten Mittellinie um so mehr, je kleiner der spitze Achsenwinkel ist, bis bei einem Achsenwinkel von 0^{0} die beiden Richtungen gleichwertig sind, d. h. der Krystall optisch einachsig erscheint.

Da die Lichtbrechung für verschiedene Farben in einem und demselben Krystall verschieden ist, müssen auch die Winkel der optischen Achsen für verschiedene Farben Unterschiede aufweisen; dann ist bald der Winkel für Rot (ρ) gröfser als der für Violett (v), man bezeichnet dies mit dem Dispersions-Symbol $\rho > v$; oder es tritt der entgegengesetzte Fall ein: $v > \rho$.

Wie an dem Beispiel des Aragonits gezeigt wurde, ist bei rhombischen Krystallen die optische Achsenebene stets eine der drei Endflächen, da die Richtungen gröfster und kleinster Lichtgeschwindigkeit mit zwei krystallographischen Achsen zusammenfallen. Im monoklinen Krystallsystem fällt nur noch eine der drei Hauptschwingungsrichtungen, und zwar für alle Farben, mit der Querachse zusammen, die beiden andern sind beliebig in der Längsfläche verteilt, stehen aber stets aufeinander senkrecht; für verschiedene Farben können sie innerhalb dieser Ebene ganz verschiedene Lage haben (Dispersion der Mittellinien, bezw. der Achsenebenen). Im triklinen Krystallsystem endlich sind die optischen Elemente in ihrer Lage durchaus unabhängig von den krystallographischen, und ebenso unabhängig voneinander sind die Verhältnisse für die einzelnen Farben; indes sind auch hier stets die drei Hauptschwingungsrichtungen für eine bestimmte Farbe aufeinander senkrecht.

Die Untersuchungen mit einem Nicol. — Pleochroïsmus.

Das Licht, welches in einen nicht regulären Krystall eintritt, wird im allgemeinen zerlegt in zwei Schwingungen, die sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen, und welche verschie-

dene Lichtabsorption, d. h., wenn die Verschiedenheit grofs genug ist, um beobachtet zu werden, verschiedene Farbe aufweisen. Beleuchten wir einen doppelbrechenden Krystall mit gewöhnlichem Licht, so beobachten wir in jedem Augenblick das Mittel aus beiden Schwingungen, da infolge der raschen Änderung der Schwingungsebene eines gewöhnlichen Lichtstrahls in jedem Augenblick gleich viel Licht parallel zu jeder der beiden Schwingungsrichtungen den Krystall durchsetzt; wir sehen also, wenn wir im gewöhnlichen Licht durch eine Fläche eines Krystalls blicken, eine mittlere Lichtbrechung und eventuell eine Mischfarbe, welche man auch als Flächenfarbe bezeichnet. Tritt dagegen geradlinig polarisiertes Licht in einen doppelbrechenden Krystall ein, so werden die den beiden Schwingungsrichtungen in dem Krystall entsprechenden Komponenten nur dann gleich sein, wenn diese 45° mit dem Nicol bilden; es wird eine derselben aber gleich Null sein, d. h. man wird nur die parallel zu der andern Richtung ausgeführten Schwingungen beobachten, wenn die Schwingungsrichtung im Nicol mit der letzteren Richtung zusammenfällt. Wir können die Eigenschaften der beiden einen Krystall durchsetzenden Strahlen nacheinander beobachten, wenn wir die beiden Schwingungsrichtungen nacheinander in parallele Stellung zum Polarisator bringen. Wir beobachten so die Brechungsexponenten, die Farbe etc. einer bestimmten Richtung und die Unterschiede, welche in verschiedenen Schwingungsrichtungen vorhanden sind.

Man wird zu allen Untersuchungen dieser Art stets den unterhalb des Präparates angebrachten Polarisator verwenden, während man den Analysator ausschaltet. Da das von dem Spiegel reflektierte Licht an sich teilweise durch Reflexion polarisiert ist, würde man bei entgegengesetztem Verfahren durch die dabei auftretenden, meist allerdings nicht sehr lebhaften Interferenzerscheinungen vielfach gestört. Aus demselben Grunde ist auch das sogen. Okulardichroskop wenig zu empfehlen. Dasselbe besteht aus einer doppelbrechenden Kalkspatplatte, welche in das Okular eingefügt ist und die beiden Farben, welche in zwei aufeinander senkrechten Richtungen eines Objektes auftreten, nebeneinander zu beobachten gestattet. Durch die erwähnte partielle Polarisation wird in besonders hohem Mafse die Beobachtung und Vergleichung von Farben beeinträchtigt.

Über die Methoden der Beobachtung der Lichtbrechung bei eingeschaltetem Polarisator braucht hier nichts mehr hinzugefügt zu werden, zumal ein sehr viel empfindlicheres Mittel zur Feststellung der Unterschiede der Lichtbrechung verschiedener Richtungen eines Krystalls in den Beobachtungen zwischen zwei

Nicolschen Prismen mittels der Interferenzfarben gegeben ist. Dagegen mufs auf die Unterschiede der Lichtabsorption eines Krystalls in verschiedenen Richtungen, die man als Pleochroïsmus bezeichnet, näher eingegangen werden.

Da in einem regulären Krystall oder einem amorphen Körper die Lichtabsorption in allen Richtungen gleich ist, erscheinen Durchschnitte von solchen bei einer vollen Umdrehung des Tisches über dem Polarisator stets mit derselben Farbe. Bei einem optisch einachsigen Mineral sind alle Richtungen senkrecht zur optischen Achse im optischen Sinne gleichwertig; es wird somit auch die Absorption des Lichtes, welche der senkrecht zur optischen Achse schwingende ordentliche Strahl aufweist, in jedem beliebigen Schnitt dieselbe sein, während die Absorption des aufserordentlichen variabel ist und sich um so mehr von derjenigen des ordentlichen entfernt, je mehr sich seine Schwingungsrichtung der Richtung der optischen Achse nähert. Wir werden somit die Farbe des ordentlichen Strahls in jedem Durchschnitt beobachten, diejenige des aufserordentlichen aber nur in einem Schnitt, welcher parallel zur optischen Achse des Krystalls geführt ist. Ferner kommt in einem Schnitt senkrecht zur optischen Achse nur die Farbe des ordentlichen Strahls in Betracht, ein derartiger Schnitt erscheint daher beim Drehen über dem Polarisator stets mit derselben Farbe. Da hier nur die beiden Farben des ordentlichen und des aufserordentlichen Strahls in Frage kommen, nennt man optisch-einachsige Krystalle, welche diesen Unterschied deutlich erkennen lassen, auch dichroïtisch.

Bei den optisch zweiachsigen Krystallen kommen für die Farbe ebenso wie für die Lichtbrechung drei verschiedene Schwingungsrichtungen in Betracht, in welchen wir Extreme der Färbung beobachten: sie sind trichroïtisch. Die reine Farbe, welche einer solchen Richtung zukommt, beobachtet man nur in einem Schnitt parallel zu derselben, in allen andern erhält man Mischfarben. Im rhombischen Krystallsystem sind die Schwingungsrichtungen gröfster, mittlerer und kleinster Lichtbrechung gleichzeitig die drei Farbenachsen; im monoklinen ist nur noch die Querachse gleichzeitig eine Farbenachse, die beiden andern liegen beliebig in der Symmetrieebene, zeigen jedoch meist keine allzu grofse Abweichung von den Schwingungsrichtungen des Lichtes; im triklinen System endlich sind beide Arten von Richtungen unabhängig voneinander. Die in der Symmetrieebene liegenden

Farbenachsen der monoklinen wie alle drei Farbenachsen der triklinen Krystalle stehen nicht aufeinander senkrecht.

Die Unterschiede der Lichtabsorption in verschiedenen Richtungen eines Krystalls, welche wir als Pleochroïsmus im weiteren Sinne bezeichnen, sind in zahlreichen Fällen, in erster Linie bei farblosen Krystallen, so gering, dafs sie selbst in dickeren Schichten sich der Beobachtung entziehen; da die Farbe eines Durchschnittes und somit auch die Unterschiede der Farbe in verschiedenen Richtungen um so weniger deutlich werden, je dünner die betreffende Schicht ist, wird man in den mikroskopischen Präparaten den Pleochroïsmus nur in solchen Substanzen beobachten können, welche sehr kräftige Unterschiede der Absorption in verschiedenen Richtungen aufweisen. Obgleich ferner bei Beobachtung eines nur schwachen Pleochroïsmus die subjektive Anschauung des Beobachters selbst ziemlich in Betracht kommt, liegt doch in der Untersuchung des Pleochroïsmus ein wichtiges Hilfsmittel bei der mikroskopischen Forschung vor.

Es ist sehr nützlich, beim Studium des Pleochroïsmus drei Fälle auseinanderzuhalten, welche man sich am besten mit Hilfe einer Farbenskala (Raddesche Farbenskala) klar machen kann, die in horizontalen Reihen die verschiedenen Farben, in vertikalen die verschiedene Intensität derselben von den dunkelsten zu den lichtesten Tönen aufweist. Es sind folgende Fälle möglich:

1. In verschiedenen Richtungen eines Krystalls werden verschiedene Teile des Spektrums absorbiert, und zwar so, dafs die Intensität des Lichtes, welches in jeder Richtung hindurchgeht, annähernd dieselbe bleibt; es erscheinen in verschiedenen Richtungen verschiedene Farben, jede aber annähernd ebenso hell wie die andere (horizontale Reihe der Farbenskala).

2. Es werden in jeder Richtung annähernd dieselben Teile des Spektrums absorbiert, aber mit sehr verschiedener Intensität; man beobachtet in allen Richtungen dieselbe Farbe, aber in verschiedenen Tönen (vertikale Reihe der Farbenskala).

3. In verschiedenen Richtungen werden verschiedene Farben des Spektrums mit verschiedener Intensität absorbiert. Man erkennt den Unterschied verschiedener Farben in verschiedener Höhe des Tons (Diagonale der Farbenskala).

Das Auseinanderhalten dieser drei Fälle liefert oft recht charakteristische Kennzeichen. So zeigt z. B. ein pleochroïtischer Pyroxen öfters in einer Richtung Lichtgrün, in einer andern Lichtgelb; ähnlich gefärbte gemeine Hornblende läfst dagegen meist eine kräftigere Absorption des grünen Strahls erkennen, also einen Pleochroïsmus von Dunkelgrün zu Lichtgelb, während am Biotit häufig nur einfache Absorptionsunterschiede derselben Farben, Lichtbraun zu Dunkelbraun in Frage kommen.

Die Stärke des Pleochroïsmus ist in einem und demselben Krystall abhängig von seiner Dicke, und man wird häufig in dickeren Schichten die Erscheinung noch deutlich beobachten können, wenn man in den dünnsten Schliffen nichts mehr davon wahrnimmt. Eine so starke Absorption des einen Strahls, dafs man in dieser Richtung selbst in den dünnsten Schliffen kein Licht mehr hindurchtreten sieht, ist äufserst selten; fast stets wird man in einer hin-

reichend dünnen Schicht auch bei den am stärksten absorbierenden Mineralien die Farbe des stärker absorbierten Strahls erkennen können.

Auch die Orientierung der verschieden absorbierten Strahlen in einem Krystall ist von Wichtigkeit, da sie bei einer und derselben Substanz in hohem Maſse konstant zu sein pflegt. So ist z. B. im Turmalin der ordentliche, in gefärbtem Apatit der auſserordentliche Strahl stets der stärker absorbierte; Turmalinprismen erscheinen am dunkelsten, wenn die Hauptachse zu der Schwingungsrichtung des Polarisators gekreuzt ist, solche von Apatit dagegen, wenn beide Richtungen parallel sind. Aus diesem Beispiel folgt das weitere, daſs nicht etwa stets der stärker gebrochene Strahl auch der stärker absorbierte sein muſs; denn die beiden erwähnten Mineralien sind optisch negativ, der parallel zur Hauptachse schwingende auſserordentliche Strahl ist somit in beiden der schwächer gebrochene.

Ausnahmsweise soll hier noch die Erscheinung der sogen. pleochroïtischen Höfe erwähnt werden. In zahlreichen Mineralien, so namentlich in Cordierit, Andalusit, Glimmer, Chlorit, Hornblende u. s. w., beobachtet man im Dünnschliff, daſs einzelne, meist rundlich abgegrenzte Stellen einen kräftigeren Pleochroismus aufweisen, als das Mineral im allgemeinen zeigt. Studiert man die Erscheinung genauer, so entdeckt man stets im Kern eines solchen „pleochroïtischen Hofes" einen kleinen Einschluſs eines titan-, zirkon-, bezw. zinnhaltigen Minerals, dessen Konturen ringsherum von einer kräftiger pleochroïtischen Zone eingefaſst sind. Ein Zusammenhang zwischen der Erscheinung der stärker pleochroïtischen Zone und dem chemischen Bestand des Einschlusses ist somit nicht zu bezweifeln, wenn man auch aus der leichten Zerstörbarkeit dieser Höfe durch Erwärmen geschlossen hat, daſs es sich um organische Farbstoffe handelt.

Ferner müssen hier noch zwei Erscheinungen besprochen werden, welche hin und wieder beobachtet werden. Die eine ist der sogen. Pseudodichroïsmus, eine Erscheinung, welche auch an völlig farblosen Krystallen auftritt. Sind in einem Krystall in groſser Anzahl winzigste, parallel orientierte Einschlüsse vorhanden, deren Lichtbrechung von der des umschlieſsenden Krystalls erheblich abweicht, und die ziemlich steil gegen die Fortpflanzungsrichtung des Lichtes geneigt sind, so wird dieses beim Durchgang durch den Krystall an den Einschlüssen eine partielle Totalreflexion erleiden, wobei die weniger brechbaren roten Strahlen mehr gegen die Mitte, die stärker brechbaren violetten gegen den Rand des Gesichtsfeldes abgelenkt werden. Diese Art der Totalreflexion erleiden aber nur die parallel zu der Richtung der Einlagerungen schwingenden Strahlen, während senkrecht dazu schwingende nicht verändert werden. Ist daher der Krystall im Zentrum des Gesichtsfeldes so orientiert, daſs die Richtung der Einlagerungen dem Hauptschnitt des Polarisators parallel ist, so erscheint er lebhaft braun; befindet er sich am Rande, so ist er grau gefärbt, während er in beiden Fällen nach einer Drehung um 90° farblos ist.

Endlich gehört hierher das Auftreten von Interferenzfarben ohne Anwendung des Analysators. Befindet sich in einem Schliff unter einem dünnen Krystall eines sehr stark absorbierenden Minerals (Biotit, Turmalin) eine beliebig orientierte Schicht eines andern doppelbrechenden Minerals, so wirkt der absorbierende Krystall, welcher ja den einen Strahl

kaum durchläfst, selbst als Analysator, und die Unterlage zeigt somit Interferenzfarben. Da beim Drehen des Präparates die absorbierende Richtung bald parallel bald senkrecht zu dem Hauptschnitt des Polarisators ist, treten beim Drehen um 90° stets die komplementären Farben auf. Ähnlich ist auch die Entstehung von Interferenzfarben in sehr stark doppelbrechenden Mineralien (Kalkspat, Rutil), welche von Zwillingslamellen durchsetzt sind, deren Richtung gegen die Schliffrichtung ziemlich stark geneigt ist.

Die Untersuchungen zwischen zwei Nicols.

Die Beobachtungen zwischen zwei Nicolschen Prismen werden fast ausschliefslich bei gekreuzten Schwingungsebenen derselben ausgeführt, und man spricht daher von Beobachtungen zwischen gekreuzten Nicols.

Bei der gewöhnlichen Zusammenstellung des Mikroskops, im sogen. parallelen polarisierten Licht, in welchem das vergröfserte Bild des zu untersuchenden Objekts zur Beobachtung gelangt, kommen folgende Bestimmungen in Betracht:

1. die Erkennung der Doppelbrechung;
2. die Bestimmung der Lage der Schwingungsrichtungen;
3. die Messung der Stärke der Doppelbrechung;
4. die Bestimmung der relativen Geschwindigkeit der beiden in einem Durchschnitt schwingenden Strahlen.

1. Die Erkennung der Doppelbrechung.

Legen wir einen beliebigen einfachbrechenden Körper oder einen Durchschnitt eines solchen zwischen die beiden gekreuzten Nicols, so wird das geradlinig polarisierte Licht, welches der Polarisator liefert, im Krystall keine Veränderung erleiden und gelangt unverändert an den Analysator, dessen Schwingungsrichtung 90° mit derjenigen des ankommenden Strahls bildet und welcher denselben somit nicht hindurchläfst. Drehen wir mittels des drehbaren Objekttisches das Präparat um 360°, so wird in keiner Stellung eine Veränderung eintreten, d. h. ein einfachbrechender Körper erscheint zwischen gekreuzten Nicols in allen Stellungen dunkel.

Betrachten wir dagegen doppelbrechende Krystalle zwischen gekreuzten Nicols, so wird nur dann das aus dem Po-

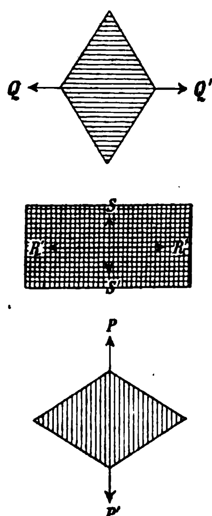


Fig. 49. Schwingungsrichtungen im Krystall parallel zu denen der Nicols.

larisator austretende Licht in dem Krystall keine Veränderung erleiden, wenn die in Fig. 49 dargestellten Umstände vorhanden sind, d. h. wenn die Schwingungsrichtungen RR' und SS' im Krystall genau parallel zu den Schwingungsrichtungen PP' und QQ' in den beiden Nicols liegen. Sind dagegen die Schwingungsrichtungen RR' und SS' schief zu PP' und QQ', wie in Fig. 50—52, so wird das aus dem Polarisator austretende, geradlinig polarisierte Licht im Krystall in zwei Komponenten Or und Os' zerlegt, welche den Schwingungsrichtungen in dem Krystall entsprechen, und von welchen bei der abermaligen Zerlegung durch den Analysator die durch diesen hindurchgehenden Komponenten $O\rho$ und $O\sigma$ sich summieren. Die Platte erscheint also in allen übrigen Stellungen hell, da eben dann stets ein Teil des Lichtes durch den Analysator hindurchgeht. Die Gröſse der Komponenten $O\rho$ und $O\sigma$ giebt das Maſs für die Helligkeit ab, und es folgt aus der Vergleichung von Fig. 50—52, daſs sie

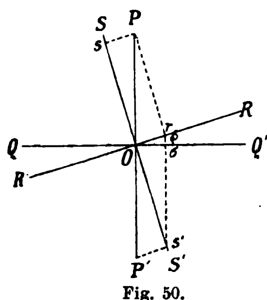


Fig. 50.

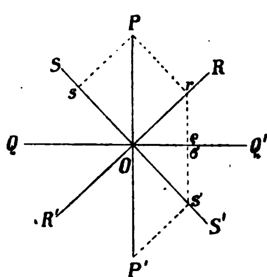


Fig. 51.

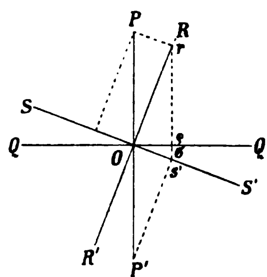


Fig. 52.

Schwingungsrichtungen im Krystall schief zu denen der Nicols.

ihr Maximum erreichen, wenn wie in Fig. 51 die Schwingungsrichtungen im Krystall 45° mit den Schwingungsrichtungen der Nicols bilden.

Da bei einer Horizontaldrehung des Objekttisches um 360° viermal die Schwingungsrichtungen RR' und SS' parallel zu PP' und QQ' zu liegen kommen, werden doppelbrechende Krystalle bei einer Horizontaldrehung um 360° zwischen gekreuzten Nicols viermal hell und dunkel.

Die höchste Helligkeit, welche erreicht ist, wenn die Schwingungsrichtungen im Krystall 45° mit denjenigen der Nicols bilden, nimmt bei weiterem Drehen ab und geht ganz allmählich in vollkommene Dunkelheit über, welche bei der Parallelstellung der beiderseitigen Schwingungsrichtungen eintritt. Diese letztere Stellung wird daher auch als Auslöschungsstellung, die Schwingungsrichtung in dem Krystall als Auslöschungsrichtung bezeichnet, deren Bestimmung in zahlreichen Fällen ein wichtiges Hilfsmittel zur Ermittlung des Krystallsystems bildet.

Die grauen Interferenzfarben niederster Ordnung (vgl. Fig. 58, S. 66), welche den niedersten Graden der Doppelbrechung entsprechen, sind äufserst schwer von vollständiger Dunkelheit zu unterscheiden. Wenn daher dünne Schnitte sehr schwach doppelbrechender Krystalle vorliegen, wird die Entscheidung manchmal schwierig, ob eine Einwirkung auf das polarisierte Licht überhaupt vorhanden ist oder nicht. Man bedient sich daher zur Erkennung sehr schwacher Doppelbrechung einiger Nebenapparate, der *Teinte sensible*, der Bravaisschen Doppelplatte u. s. w., welche unter den Stauroskopen näher beschrieben werden. Da die Änderungen der Interferenzfarben solcher Hilfsapparate, welche durch äufserst schwach doppelbrechende Plättchen hervorgebracht werden, viel leichter festzustellen sind als der Unterschied zwischen völliger Dunkelheit und ganz schwacher Aufhellung, läfst sich selbst in den zweifelhaftesten Fällen bei Anwendnng derselben noch eine Entscheidung über das Vorhandensein einer Doppelbrechung treffen.

2. Die Bestimmung der Lage der Schwingungsrichtungen. Die Stauroskope.

Nach obigem bestimmt man die Lage der Schwingungsrichtungen, indem man zwischen gekreuzten Nicols den Krystall in diejenige Stellung bringt, in welcher er völlig dunkel ist; dann liegen die Schwingungsrichtungen im Krystall parallel zu den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols. Da aber an dem justierten Mikroskop die Fäden des Fadenkreuzes den letzteren Schwingungsrichtungen genau parallel sind, so stellt man zunächst eine charakteristische Krystallkante oder Spaltungsrichtung mittels des drehbaren Objekttisches parallel zu einem Faden des Fadenkreuzes und liest an der Marke des Objekttisches ab. Dann schiebt man den Analysator ein und dreht den Tisch, bis der Krystall vollständig dunkel erscheint, liest wieder ab und hat in der Differenz den Winkel, welchen die Schwingungsrichtung mit der betreffenden Krystallkante oder Spaltungsrichtung bildet.

Die Einstellung auf die vollständige Dunkelheit ist nun aber wegen des allmählichen Überganges von Hell zu Dunkel nicht genau auszuführen, und es wird namentlich der minder Geübte grofse Schwierigkeiten haben, die wahre Dunkelstellung selbst auf ziemlich beträchtliche Differenzen zu treffen. Man geht daher bei dieser Bestimmung in der Weise vor, wie dies Fig. 53 darstellt. PP' und QQ' stellen auch hier die Schwingungsrichtungen der beiden Nicols dar. Man dreht zuerst den Tisch in der Richtung des Pfeiles I so weit, bis der Krystall, dessen lange Kante vorher parallel zu PP' gelegen haben mag, die Stellung A' erreicht hat, in welcher er völlig dunkel erscheint; dann dreht man weiter gegen die Richtung QQ' zu. Nun geht man wieder zurück in der Richtung des Pfeiles II, bis man wieder, etwa in der Stellung A'', die Dunkelheit erreicht hat. Die Richtung a, welche den Winkel der beiden Richtungen a' und a'' halbiert, d. h. das Mittel der beiden Einstellungen, giebt die wahre Schwingungsrichtung. Wiederholt man die gleiche Manipulation mehrfach, so wird man in dem Mittel einer gröfseren Zahl von Ablesungen der wahren Dunkelstellung ziemlich nahe kommen.

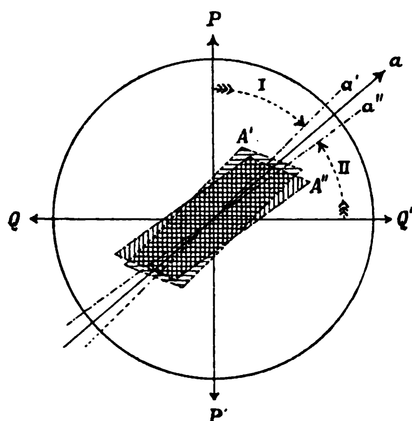
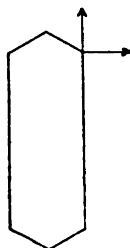
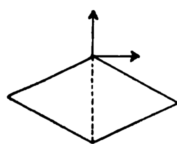


Fig. 53. Bestimmung der Auslöschungsrichtung.

An hexagonalen, tetragonalen und rhombischen Krystallen beobachtet man, da die Schwingungsrichtungen mit den Krystallachsen zusammenfallen, im allgemeinen gerade (Fig. 54) oder symmetrische (Fig. 55) Auslöschung. Da hier ferner die Schwingungsrichtungen für alle Farben dieselben sind, nimmt man die Bestimmung im weifsen Lichte vor. Monokline Krystalle zeigen nur auf den Flächen der Zone der Querachse gerade oder symmetrische Auslöschung, während auf den übrigen Flächen eine Auslöschungsschiefe (Fig. 56) vorhanden ist, d. h. eine unsymmetrische Abweichung der Lage der Schwingungsrichtungen von der Richtung der Krystallkanten. Da diese Abweichung ferner für


Fig. 54. Gerade


Fig. 55. Symmetrische Auslöschung.

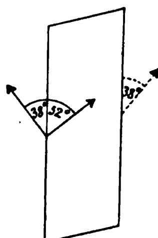


Fig. 56. Schiefe

verschiedene Farben verschieden ist, wird die Einstellung der Dunkelheit im weifsen Licht nur unvollkommen erreicht, und man bestimmt daher die Auslöschungsschiefe besser im monochromatischen Licht, wenn es sich nicht blofs um eine allgemeine Orientierung, sondern um eine genaue Messung handelt.

Wenn man die Auslöschungsschiefe bestimmt, so mufs man des ferneren noch darauf achten, ob man die Messung von der Krystallkante aus nach vorn oder nach hinten vornimmt. Die Unterschiede, welche sich aus der Verwechslung beider Richtungen ergeben, zeigt Fig. 56; der gestrichelte Pfeil zeigt in derselben die falsch eingezeichnete Schwingungsrichtung, deren richtige Lage die ausgezogenen Pfeile geben. Der Anfänger wird am besten thun, wenn er sich eine Skizze des Krystalls anfertigt, diese in parallele Lage mit dem dunkelgestellten Krystall bringt und nun parallel zu den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols Gerade einzeichnet; diese sind die gesuchten Schwingungsrichtungen in ihrer wahren Lage.

Wie schon oben bemerkt, zeigen hexagonale, tetragonale und rhombische Krystalle im allgemeinen gerade Auslöschung, da ihre Hauptentwicklung meistens entweder parallel oder symmetrisch zu einer der Hauptschwingungsrichtungen ist. Unter den monoklinen sind solche nicht selten, welche langprismatisch parallel zur Querachse (Epidot, Wollastonit) entwickelt sind, bei welchen also die hauptsächlichste Zone diejenige gerader Auslöschung ist; es ist klar, dafs in dieser Art ausgebildete Krystalle im Dünnschliff leicht mit solchen verwechselt werden, welche in allen Durchschnitten gerade auslöschen, da Durchschnitte quer zu ihrer Längserstreckung an Menge stets zurücktreten. Andere monokline Krystalle sind tafelig nach der Basis oder prismatisch nach einer in der Längsfläche liegenden Richtung; an ihnen wird der monokline Charakter der Lage der Schwingungsrichtungen im Dünnschliff stets viel leichter kenntlich sein. Trikline Krystalle endlich können sehr wechselnd entwickelt sein, und man hat nur selten einen Anhaltspunkt, um dieselben richtig zu orientieren.

Der Wert der Auslöschungsschiefe eines monoklinen Minerals wird auf der Längsfläche bestimmt, und die Angaben darüber beziehen sich, wenn nichts Besonderes angegeben ist, stets auf die Längsfläche. Der Wert derselben auf irgend einer intermediären Fläche stellt nur dann ein für die Bestimmung des Krystalls wichtiges Kennzeichen dar, wenn die Auslöschungsschiefe auf der betreffenden Fläche für die in Frage kommende Substanz genau bekannt ist. Aus der Neigung einer Fläche gegen die Längsfläche läfst sich dieselbe im allgemeinen nicht berechnen, da die Auslöschungsschiefe in einer Zone, z. B. von der Längs-

fläche zur Querfläche, nicht gleichmäfsig abnimmt, ja sogar auf einer dazwischen liegenden Fläche einen höheren Wert erreichen kann als auf der Längsfläche selbst. Da aber die Auslöschungsschiefe auf einer bestimmbaren Fläche für eine Substanz einen sehr charakteristischen Wert darstellt, sollte wenigstens für solche monokline Körper, welche nach den Prismenflächen gut spaltbar sind, neben der Auslöschungsschiefe auf der Längsfläche auch jene auf der Prismenfläche angegeben werden, zumal man, wenn der Winkel des Prismas selbst bekannt ist, aus diesen beiden Werten den wahren optischen Achsenwinkel direkt berechnen kann.

Am besten illustriert diese Verhältnisse das Beispiel des Diopsids, welcher auf der Längsfläche eine Auslöschungsschiefe von 38° aufweist. Mifst man mittels eines der im Anhang besprochenen Drehapparate die Auslöschungsschiefe an einem Krystall in der Zone von Längsfläche zu Querfläche auf verschiedenen, je 10° gegeneinander geneigten Flächen und trägt die erhaltenen Werte in vertikalen Abszissen ein, während man in horizontalen Abschnitten die Neigung der betreffenden Fläche zur Längsfläche einzeichnet, so erhält man die in Fig. 57 dargestellte Kurve, aus welcher direkt die Auslöschungsschiefe für jede beliebige Fläche der Zone abgelesen werden kann, so z. B. auch für das Prisma, dessen Winkel beim Pyroxen nicht sehr entfernt von 90°, dessen Hälfte also annähernd gleich 45° ist, und auf welchem noch eine Auslöschungsschiefe von 30° auftritt. Es folgt aus dem Verlauf dieser Kurve aber noch ein weiterer, für die Untersuchung von Dünnschliffen besonders wichtiger Umstand. Da die Auslöschungsschiefe des Pyroxens von der Querfläche aus, in welcher symmetrische Auslöschung stattfindet, sehr rasch zunimmt, wird man nur in sehr genau orientierten Durchschnitten gerade Auslöschung finden, Durchschnitte, welche natürlich im Dünnschliff äufserst selten sind. Man kommt so leicht zu dem Irrtum, als läge ein triklines Mineral vor, welches überhaupt in allen Schnitten schiefe Auslöschung aufweist.

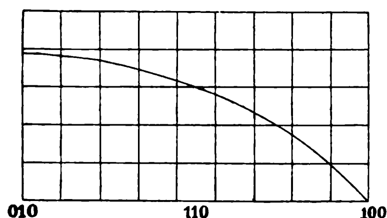


Fig. 57.
Kurve der Auslöschungsschiefe des Diopsids.

Bei triklinen Mineralien ist die Bestimmung der Auslöschungsschiefe nur dann von Wert, wenn man die Fläche, durch

welche man beobachtet, genau orientieren kann. Während die Orientierung der Längsfläche eines monoklinen Krystalls nach den später zu besprechenden Methoden der Untersuchung im konvergenten polarisierten Licht leicht festzustellen ist, da diese Fläche entweder parallel oder senkrecht zur Ebene der optischen Achsen liegt, ist eine solche Bestimmung bei triklinen Krystallen auf optischem Wege im allgemeinen nicht möglich. Hin und wieder bietet der Verlauf von Spaltrissen, Zwillingsbildungen u. s. w. einen Anhaltspunkt dar, und nur in solchen Fällen wird die Messung der Auslöschungsschiefe bei triklinen Krystallen von gröfserer Bedeutung sein.

Die einfache Einstellung auf Dunkelheit, wie sie oben beschrieben wurde, reicht für feinere Messungen nicht aus, und man hat eine Reihe von Methoden erdacht, welche den Resultaten mehr Exaktheit verleihen. Besonders bei farblosen Mineralien bewährt es sich, wenn man zuerst zwischen gekreuzten Nicols die Auslöschungsstellung möglichst genau sucht und nun, während man den Analysator dreht, beobachtet, ob gleichmäfsig mit der Aufhellung des ganzen Gesichtsfeldes auch der Krystall allmählich heller wird, und ob er in jeder Stellung der beiden Nicols zu einander genau denselben Ton aufweist wie das umgebende Gesichtsfeld. Erst wenn dies der Fall ist, ist die Einstellung vollkommen.

Wo es sich um Spezialarbeiten handelt, wendet man zu demselben Zweck eine Reihe von Nebenapparaten an, welche man allgemein als Stauroskope bezeichnet. Die wichtigeren von diesen sind:

1. das Kobellsche Stauroskop;
2. die Brezinasche Doppelplatte;
3. die Calderonsche Doppelplatte;
4. die Bertrandsche Platte;
5. die *Teinte sensible;*
6. die Bravaissche Doppelplatte;
7. die Biotsche Quarzplatte;
8. der Halbschattenpolarisator;
9. der Zwillingspolarisator.

1. Das Kobellsche Stauroskop besteht aus einer senkrecht zur optischen Achse geschnittenen Platte von Kalkspat, welche man zwischen die Augenlinse des Okulars und den aufsetzbaren Analysator einlegt. Man sieht nun das Achsenbild eines optisch-einachsigen Krystalls, welches sofort stark gestört erscheint, sobald aufserdem zwischen den beiden Nicols eine wenn auch in ganz geringem Mafse doppelbrechende Substanz vorhanden ist. Die Schwingungsrichtungen in dem zu untersuchenden Krystall sind erst dann richtig eingestellt, wenn jede Störung des Achsenbildes verschwunden ist.

2. Die Brezinasche Doppelplatte ersetzt diesen einfachen Apparat durch zwei nebeneinander liegende Platten, gleichfalls von Kalkspat, welche nach entgegengesetzter Richtung gleichmäfsig schief zur Basis, und zwar symmetrisch zur Zusammensetzungsfläche, geschnitten sind. Das in diesem Fall auftretende

kombinierte Achsenbild zeigt in der Mitte des Gesichtsfeldes einen einzigen Balken, umgeben von farbigen Kurven. Sind die Schwingungsrichtungen in dem Krystall nicht genau gleich denjenigen der Nicols, so erscheint der Teil des Balkens, welcher über dem Krystall liegt, gegen die darüber hinausstehenden Teile desselben gebrochen.

3. Die Calderonsche Doppelplatte pflegt innerhalb eines eigens dazu angefertigten Okulars angebracht zu sein. Sie besteht aus zwei keilförmig geschnittenen Stücken von Kalkspat, deren Berührungsebene von oben betrachtet sich als scharfe Linie darstellt, gegen welche die Schwingungsrichtungen in beiden Hälften symmetrisch sind. Ist diese Grenze genau parallel zu den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols, so zeigen beide Hälften das gleiche Mafs von Auslöschung. Fügt man nun eine doppelbrechende Platte in den Gang der Strahlen ein, deren Schwingungsrichtungen von denjenigen der Nicols abweichen, so wird die Helligkeit der beiden Hälften der Doppelplatte, deren Schwingungsrichtungen schief zu einander stehen, verschieden verändert, und erst bei genauer Einstellung der Auslöschungsrichtung in der Krystallplatte ist die gleiche Helligkeit wieder hergestellt.

4. Die Bertrandsche Platte ist ebenso wie die vorhergehende gewöhnlich in einem eigenen Okular untergebracht. Sie besteht aus vier Sektoren von abwechselnd rechtsdrehendem und linksdrehendem Quarz, welcher in einer Dicke von ca. 2,5 *mm* senkrecht zur Achse geschnitten ist. Durch einen hinzugefügten doppelbrechenden Krystall werden die an sich bläulichweifsen Interferenzfarben der vier Sektoren in verschiedener Weise verändert, wenn die Schwingungsrichtungen in dem Krystall nicht genau mit denen der Nicols zusammenfallen. Ist dies aber der Fall, dann müssen die vier Sektoren bei einer vollen Horizontaldrehung der Nicols stets untereinander gleich gefärbt sein.

5. Die *Teinte sensible*, in Fig. 58 das Violett I am Beginn der zweiten Farbenordnung, wird gewöhnlich (siehe auch Nr. 7) in der Weise hervorgebracht, dafs man ein dünnes Plättchen eines farblosen, schwach lichtbrechenden Minerals (Quarz, Gips) in der Dicke anfertigt, dafs es zwischen gekreuzten Nicols die betreffende Interferenzfarbe giebt. Man befestigt dasselbe am besten zwischen zwei schmalen Glasstreifen und führt es in den Schlitz oberhalb des Objektivs in der Weise ein, dafs seine Schwingungsrichtungen 45° mit denjenigen der Nicols bilden. Wie Fig. 58 zeigt, genügt schon eine Verzögerung von 0,00001 *mm*, diese Farbe einesteils in Purpur, andernteils in Indigo zu verändern; gleichzeitig sieht man aus der dort gegebenen Zusammenstellung der Interferenzfarben, dafs das Violett I von allen Interferenzfarben, welche zwischen gekreuzten Nicols auftreten, am leichtesten eine deutlich erkennbare Änderung erleidet. Gleichfalls als *Teinte sensible* verwendbar ist das Tiefviolett erster Ordnung, welches eine Platte von der halben Dicke der oben angeführten zwischen parallelen Nicols giebt, während das ebenfalls oft als Stauroskop angewandte Violett II am Anfang der dritten Farbenordnung für die hier in Betracht kommenden Zwecke weniger brauchbar ist, weil dort die Änderung der Farben erst in gröfseren Zwischenräumen vor sich geht. Die *Teinte sensible* wird nicht nur zur genauen Einstellung der Schwingungsrichtungen, sondern ebenso häufig auch als Kompensator (siehe weiter unten) oder als Mittel zur Erkennung sehr schwacher

Doppelbrechung benutzt, da eben schon die Einschaltung eines im geringsten Maſse doppelbrechenden Krystalls genügt, um diese Farbe lebhaft zu beeinflussen.

6. Die Bravaissche Doppelplatte gestattet in noch höherem Maſse, die Verwendbarkeit der *Teinte sensible* auszunutzen. Eines der unter 5 erwähnten Plättchen wird diagonal zu seinen Schwingungsrichtungen zerschnitten und die eine Hälfte gegen die andere um 180° gedreht. In den beiden Hälften liegen dann die gleichwertigen Schwingungsrichtungen um 90° gegen einander verwendet, und die Änderung, welche die eine derselben durch einen hinzugefügten doppelbrechenden Krystall in einer Richtung erfährt, verläuft in der andern in entgegengesetzter Richtung, so daſs man infolge der Nebeneinanderstellung der beiden Farbenänderungen dieselben noch im denkbar geringsten Maſs erkennen kann. Diese Methode ist so exakt, daſs man damit die Doppelbrechung eines Glaswürfels beobachtet, welche derselbe annimmt, wenn man ihn kräftig mit den Fingern zusammenpreſst. Es ist dies überhaupt die genaueste Methode zur Erkennung der Doppelbrechung an sich wie zur Bestimmung der Auslöschungsrichtung, deren Wert nur dadurch beeinträchtigt wird, daſs sie auf einer Änderung der Interferenzfarben beruht und daher in monochromatischem Licht, d. h. für die Bestimmung der Auslöschungsrichtung monokliner und trikliner Krystalle nicht verwendet werden kann.

7. Die Biotsche Quarzplatte ist eine 3,75 *mm* dicke Platte, senkrecht zur Achse geschnitten, welche zwischen den Nicols beim Drehen des Analysators verschiedene charakteristische Interferenzfarben, darunter auch bei einer bestimmten Stellung des Analysators das empfindliche Violett zeigt. Während dieses hauptsächlich zur Bestimmung der Auslöschungsrichtung farbloser Krystalle dient, sollen andere Farben besser geeignet sein, wenn es sich um die Messung gefärbter Substanzen handelt. Auſserdem kann man, wenn die richtige Stellung gefunden ist, dieselbe noch dadurch kontrollieren, daſs man den Analysator dreht und so die Richtigkeit bei den verschiedenen Interferenzfarben prüft. Die Biotsche Quarzplatte ist meistens so gefaſst, daſs sie in den Schlitz über dem Objektiv eingeschoben werden kann.

8. Der Halbschattenpolarisator ist ein Nicol, welcher etwas schief zu seinem Hauptschnitt in der Mitte geteilt und umgekehrt wieder zusammengekittet wurde. Die Schwingungsrichtungen bilden so einen kleinen Winkel miteinander. Er wird an Stelle des Polarisators eingesetzt, und beide Hälften erscheinen im gleichen Halbschatten, wenn der Hauptschnitt des Analysators den Winkel derselben halbiert.

9. Der Zwillingspolarisator unterscheidet sich vom letzteren dadurch, daſs die Schwingungsrichtungen in den beiden Hälften um 90° gegeneinander gedreht sind. Die Verwendung beider Apparate ist indes eine sehr begrenzte, da man die Trennungsfuge gleichzeitig mit dem Krystall scharf sehen muſs, also nur Objektive mit dem gröſsten Fokalabstand benutzen kann.

Diejenigen Stauroskope, bei welchen es sich um Änderung der Interferenzfarben handelt, können ausschlieſslich zu Bestimmungen im weiſsen Licht verwendet werden; sie sind also nicht verwendbar, wenn es sich um die Bestimmung der Auslöschungsrichtungen stärker dispergierender, monokliner und trikliner Substanzen handelt, welche im monochromatischen Licht vorgenommen werden muſs; in diesem Falle ist am empfehlenswertesten die Brezinasche Doppelplatte oder das Kobellsche Stauroskop.

3. Die Messung der Stärke der Doppelbrechung. Die Interferenzfarben.

Die beiden Strahlen, in welche das Licht von einem doppelbrechenden Krystall zerlegt wird, schwingen mit verschiedener Geschwindigkeit, sie pflanzen sich daher verschieden rasch fort, und beim Austritt aus dem Krystall ist der eine gegen den andern um eine bestimmte Gröfse verzögert, welche von dem Unterschied der Schwingungsgeschwindigkeit und von der Dicke des Krystalls abhängt. Werden die beiden Strahlen durch den Analysator wieder auf eine Schwingungsebene zurückgeführt, so weisen sie eine Phasendifferenz auf. Nun gilt der Satz: Zwei geradlinig polarisierte Strahlen, welche durch Doppelbrechung aus einem einzigen geradlinig polarisierten Lichtstrahl entstanden sind, interferieren miteinander, wenn sie wieder auf eine und dieselbe Polarisationsebene zurückgeführt werden.

Da das gewöhnliche weifse Licht aus verschiedenen Farben von sehr verschiedener Wellenlänge λ zusammengesetzt ist, so wird bei einer bestimmten Dicke des Krystalls, welcher eine bestimmte Verzögerung des einen Strahls gegen den andern entspricht, die Phasendifferenz für die Schwingungen der verschiedenen Farben verschieden sein. Während sich so die beiden Strahlen für eine bestimmte Farbe durch Interferenz addieren und diese daher mit besonderer Lebhaftigkeit hervortritt, werden für eine andere Farbe die beiden Schwingungen sich gegenseitig aufheben, es wird also kein Licht von der betreffenden Farbe durch den Analysator hindurchgehen. An Stelle des weifsen Lichtes treten somit Farben auf, welche man als Interferenzfarben bezeichnet.

Bei der Interferenz des Lichtes haben wir zwei Fälle zu unterscheiden, je nachdem die Schwingungsebene des Analysators parallel oder senkrecht zu derjenigen des Polarisators ist, da die aus dem Krystall austretenden Strahlen im ersteren Fall mit gleicher, im letzteren mit entgegengesetzter Phase zur Interferenz kommen. Es werden somit bei parallelen Nicols (|| Nicols) diejenigen Farben mit besonderer Intensität hervortreten, welche zwischen gekreuzten Nicols (+ Nicols) ausgelöscht werden, und umgekehrt, so dafs die Interferenzfarben, welche wir zwischen parallelen Nicols beobachten, die Komplementärfarben derjenigen zwischen gekreuzten Nicols sind.

+ Nicols		‖ Nicols
schwarz	0	weifs
eisengrau	50	weifs
lavendelgrau	100	gelblichweifs
graublau	150	bräunlichweifs
graulichweifs	200	braungelb
weifs	250	hellrot, carmin, rotbraun
hellgelb	300	tiefviolett, indigo
lebhaftgelb	350	blau
orangegelb	430	graublau
orange	450	
rotorange	500	bläulichgrün
rot	530	blassgrün
tiefrot	550	gelblichgrün
purpur	565	hellgrün
violett I	575	grüngelb
indigo	589	goldgelb
himmelblau	664	orange
grünlichblau	728	bräunlichorange
grün	747	hellcarmin
grün	800	purpur
gelblichgrün	850	violett
gelb	910	indigo
orange	948	dunkelblau
orangerot	1000	grünlichblau
rot	1060	grün
violettrot	1100	grün
violett II	1128	gelblichgrün
indigo	1151	gelb

Fig. 58. Die Interferenzfarben.

Betrachten wir den letzteren Fall, welcher in der mikroskopischen Technik fast ausschliefslich in Betracht kommt, etwas näher und nehmen wir der Einfachheit halber an, dafs durch einen doppelbrechenden Krystall von bestimmter Dicke die gleiche absolute Verzögerung für alle Farben hervorgebracht wird. Die Wellenlänge λ des äufsersten Violett beträgt ca. 380, diejenige des äufsersten Rot ca. 775 $\mu\mu$ (Milliontel Millimeter). Da zwischen gekreuzten Nicols wegen der Umkehrung der Schwingungsphase im Analysator diejenigen Farben besonders hervortreten, für welche die Verzögerung $= {}^1/_2\,\lambda$ oder einem ungeraden Vielfachen von ${}^1/_2\,\lambda$ ist, während diejenigen ausgelöscht werden, welche um eine oder mehrere ganze Wellenlängen gegeneinander verzögert sind, so kann man leicht die Interferenzfarbe eines Krystalls

ableiten, wenn seine Dicke und die Höhe seiner Doppelbrechung bekannt sind, von welchen beiden Faktoren eben die Verzögerung abhängig ist. Oder man kann aus der Interferenzfarbe bei bekannter Dicke des Präparates die Doppelbrechung, bei bekannter Doppelbrechung dessen Dicke bestimmen. Nehmen wir an, die Verzögerung der beiden Strahlen in einem Krystall betrage nur 50 $\mu\mu$ (vgl. Fig. 58), so wird für alle Farben beim Austritt aus dem Krystall eine geringe Phasendifferenz vorhanden sein, es wird somit etwas Licht, aber etwa gleich wenig von jeder Farbe, durch den Krystall hindurchgehen, und wir bekommen den Eindruck einer grauen Färbung. Bei einer etwas gröſseren Verzögerung wird durch ein etwas stärkeres Hervortreten des Violett ein lavendelgrauer Ton hervorgebracht; dann folgen ein lichtes Graublau, Grünlichweiſs und endlich Gelbweiſs, da nacheinander Blau, Grün und Gelb etwas stärker hervortreten, bis endlich bei einer Verzögerung von ca. 300 $\mu\mu$, welches etwa die halbe Wellenlänge eines sehr intensiven Gelb ist, diese Farbe besonders aufleuchtet, während gleichzeitig das äuſserste Violett ($\lambda = 380$) fast ganz ausgelöscht wird. Der Gesamteindruck ist derjenige einer lebhaft gelben Farbe. Betrachten wir diese Interferenzfarbe durch das Spektroskop, so sehen wir ein besonders kräftiges Leuchten in dem gelben Teil des Spektrums, welches nach beiden Seiten zu weniger hell erscheint, bis im Violett endlich kein Licht mehr sichtbar ist. Nehmen wir etwa die doppelte Verzögerung, ca. 575 $\mu\mu$, so ist dies gleich der ganzen Wellenlänge eines Gelb, welches der Na-Linie naheliegt, dieses wird daher vernichtet, während dagegen ein lebhaftes Violett mit nahezu $1^1/_2\ \lambda$ Phasendifferenz zur Interferenz kommt und mit doppelter Intensität hervortritt, und auf der andern Seite des Spektrums etwas Rot hinzukommt; die entsprechende Interferenzfarbe ist somit ein Rotviolett (in Fig. 58 Violett I), und wir sehen bei spektroskopischer Betrachtung ein besonders starkes Aufleuchten des violetten Teiles des Spektrums, während im Gelb ein dunkler Streifen vorhanden ist. Da aber andernteils das Violett im Spektrum an sich die am wenigsten leuchtende Farbe darstellt, so wird durch eine ganz geringe Änderung der Verzögerung diese Interferenzfarbe ungemein stark beeinfluſst, wie dies Fig. 58 deutlich zeigt. Man bezeichnet diese Farbe daher als empfindliches Violett *(teinte sensible)*. Man kann nun in derselben Weise fortfahren, die Veränderungen zu berechnen, welche das weiſse Licht bei andern Verzögerungen

erleidet, und man findet so, dafs dem Violett ein Blau, diesem Grün u. s. w. folgt, bis man wieder beim Violett angelangt ist, worauf wieder Blau u. s. w. folgen. Die Reihe der Farben von einem Violett zum andern bezeichnet man als eine Ordnung und unterscheidet so die Farben erster, zweiter, dritter u. s. w. Ordnung.

Betrachten wir z. B. eine Farbe dritter Ordnung etwas genauer, etwa diejenige, welche durch eine Verzögerung von 1500 $\mu\mu$ entsteht, so ist das die doppelte Wellenlänge eines lebhaften Rot, die dreifache eines Blaugrün, die vierfache des äufsersten Violett: diese werden daher ausgelöscht, während dagegen in Gelb und Blau Addition stattfindet. Das Gesamtresultat ist infolge der gröfseren Intensität des gelben Teiles im Spektrum ein gelber Farbenton, welcher aber gegenüber dem zuerst besprochenen Gelb etwas gemischt erscheint und nicht mehr den Eindruck eines reinen Gelb hervorbringt, d. h. in den höheren Farbenordnungen treten an Stelle der lebhaften Farben niederer Ordnung mattere Mischfarben. Nehmen wir eine Verzögerung von ca. 5000 $\mu\mu$ an, so ist dies 7 λ eines intensiven Rot, 8 λ von Orange, 9 λ von Gelbgrün, 10 λ von Grün, 11 λ von Blau, 12 λ von Blauviolett, 13 λ von Violett; diese Farben werden somit ausgelöscht, während dazwischen in Rot, Gelb, Grün, Blau und Violett eine Addition der Schwingungen stattfindet, welche zusammen wiederum als Weifs zur Beobachtung kommen; man nennt diese Interferenzfarben Weifs höherer Ordnung gegenüber dem durch sehr geringe Verzögerung hervorgebrachten Weifs erster Ordnung. Die Unterscheidung dieser beiden Arten von weifsen Interferenzfarben mag für den Anfänger öfters Schwierigkeiten mit sich bringen; das durch vielfache Interferenz entstandene Weifs höherer Ordnung zeigt häufig ein mildes, perlmutterähnliches Aussehen, während das Weifs erster Ordnung im allgemeinen etwas mit Grau, Grün oder Gelb gemischt ist.

Je gröfser der Öffnungswinkel des Beleuchtungs- und Beobachtungsapparates ist, desto weniger rein erscheinen die Interferenzfarben, einesteils weil das die Linsen in sehr schiefer Richtung durchsetzende Licht in hohem Mafse eine partielle Umpolarisierung in denselben erfährt, andernteils weil dann der Krystall selbst von Strahlen sehr verschiedener Richtung durchsetzt wird, welche infolgedessen auch verschiedene Verzögerung erlitten haben. Es mischen sich dann die Polarisationsfarben miteinander, was natürlich eine exakte Bestimmung sehr erschwert. Bei Anwendung weitwinkliger Systeme wird man daher im allgemeinen zu Untersuchungen im parallelen polarisierten

Licht den Beleuchtungskegel so weit einengen, als dies die zur Verfügung stehende Lichtquelle irgend gestattet.

Zur Beobachtung der Interferenzfarben bedient man sich gewöhnlich der beiden Nicols in gekreuzter Stellung, nur in verhältnismäfsig seltenen Fällen ist eine Beobachtung zwischen parallelen Nicols angezeigt, und zwar namentlich dann, wenn es sich um sehr schwach doppelbrechende Krystalle handelt, die zwischen gekreuzten Nicols nur wenig aufhellen, so dafs die Beobachtung der vorhandenen Doppelbrechung nicht ganz sicher erscheint; zwischen parallelen Nicols beobachtet man dann (vgl. Fig. 58) öfters noch ziemlich deutliche Farbentöne.

Bei der Ableitung der Interferenzfarben wurde im obigen angenommen, dafs die Verzögerung des einen Strahls gegen den andern für alle Farben gleich sei, was aber durchaus nicht der Fall ist. Ebenso wie die Lichtbrechung selbst für verschiedene Farben verschieden ist, ist es mit den Unterschieden der Lichtbrechung, welche im polarisierten Licht die Interferenzfarben hervorbringen, wie z. B. aus nebenstehender Zusammenstellung der Brechungsexponenten des Kalkspates für die verschiedenen Linien des Spektrums hervorgeht.

	ω	ε	$\omega - \varepsilon$
A	1,650	1,483	0,167
B	1,653	1,484	0,169
D	1,658	1,486	0,172
F	1,668	1,491	0,177
H	1,683	1,498	0,185

Infolge dieser Verschiedenheiten in der Differenz der Brechungsexponenten für die verschiedenen Farben werden auch die an verschiedenen Substanzen auftretenden Interferenzfarben bei gleicher mittlerer Verzögerung nicht vollständig identisch sein. Allerdings sind die Unterschiede im allgemeinen nicht allzu grofs, so dafs eine direkte Vergleichung der Interferenzfarben verschiedener Krystalle für den Geübteren wenigstens fast immer möglich ist. Hauptsächlich in zwei Fällen aber machen sich diese Unterschiede in empfindlicher Weise geltend:

Erstens bei sehr schwach doppelbrechenden Substanzen, bei welchen hin und wieder die Beobachtung gemacht werden kann, dafs dieselben für das eine Ende des Spektrums negative, für das andere positive Doppelbrechung aufweisen, während für eine intermediäre Farbe keine Doppelbrechung vorhanden ist. Diese letztere Farbe wird daher stets ausgelöscht sein, und an Stelle der grauen und weifsen Töne niederster Ordnung tritt nun die Komplementärfarbe jener Farbe, für welche die Doppelbrechung gleich Null ist, welche schon bei nur eben bemerkbarer Einwirkung auf das polarisierte Licht deutlich hervortritt und mit zunehmender Dicke des Präparates mehr und mehr an Intensität und Helligkeit zunimmt.

Der andere Fall ist folgender: In einem monoklinen oder triklinen Mineral findet eine starke Dispersion der Schwingungsrichtungen für verschiedene Farben statt, die verschiedenen Farben schwingen somit in verschiedenen Ebenen, und es werden infolgedessen beim Drehen eines solchen Krystalls zwischen gekreuzten Nicols nicht alle Farben gleichzeitig ausgelöscht; an Stelle völliger Auslöschung erhält man einen Farbenwechsel von gelblichen zu violetten Tönen. Auch die Beschaffenheit der Interferenzfarbe bei einer Stellung der Schwingungsrichtungen unter 45° zu den Nicols wird durch diese Dispersion wesentlich beeinflufst. Derartige anomale Interferenzfarben bezeichnet man auch als Dispersionsfarben.

[illegible]

di[illegible]
al[illegible]
fa[illegible]
ge[illegible]
Di[illegible]
far[illegible]
bri[illegible]
Ord[illegible]
wäh[illegible]
Gra[illegible]

appar[illegible]
weil [illegible]
Mafs[illegible]
dann [illegible]
wird, [illegible]
misch[illegible]
exakte[illegible]
wird m[illegible]

So interessant dieser Apparat auch erscheinen mag, so ist er doch nur in Ausnahmefällen mit Nutzen zu verwerten. Die Modifikationen, welche die Interferenzfarben durch die verschiedene Doppelbrechung für verschiedene Farben, durch die verschiedene Lichtbrechung der Krystalle, durch ihre Durchsichtigkeit etc. erfahren, sind schon bedeutend genug, um eine absolute Vergleichung der Interferenzfarben wenigstens sehr zu erschweren. Dazu kommen durch die verschiedene Intensität der Beleuchtung der beiden zu vergleichenden Objekte Unzuträglichkeiten in der Bestimmung, welche aufserdem überhaupt nur an völlig farblosen Mineralien zum Ziele führt. Das wichtigste aber ist, dafs eine Bestimmung der Doppelbrechung mittels dieser Methode nur möglich ist, wenn die Dicke des Präparates bekannt ist, und nur dann einen Zweck hat, wenn genau orientierte Durchschnitte vorliegen. Die Messung der Dicke kann man nun zu solchen Zwecken dadurch ausführen, dafs man bei Anfertigung eines Dünnschliffs zusammen mit dem Gesteinsbruchstück an den verschiedenen Ecken des Präparates kleine Platten von Quarz parallel zur optischen Achse dünnschleift, deren Interferenzfarben in dem fertigen Präparat den Mafsstab für die Dicke desselben abgeben, vorausgesetzt dafs die Schliffläche nicht gewölbt ist, was aber im allgemeinen doch der Fall sein dürfte. Gewöhnlich wird man bei einiger Übung durch blofse Betrachtung der Interferenzfarben rascher und sicherer eine Bestimmung der Höhe derselben ausführen können, oder wenn dies nicht angeht, einen der später zu besprechenden Kompensatoren anwenden, die sehr viel exaktere Bestimmungen gestatten.

Besonders ungenau wird die Messung, wenn es sich um die grauen nd graublauen Interferenzfarben niederster Ordnung handelt. Es wurde vorschlagen, in solchen Fällen direkt unter dem Präparat einen horizontalen piegel anzubringen. Das Licht wird dann durch eine in den Tubus über dem nalysator eingeschobene Spiegelvorrichtung durch diesen und das Präparat uf den Spiegel geworfen. Von diesem reflektiert, durchsetzt es das Prärat und den Analysator zum zweitenmal, bevor es zum Auge gelangt, d man erhält den Eindruck, als würde man eine doppelt so dicke Platte ischen parallelen Nicols betrachten. Aber auch in solchen Fällen erzielt an mittels der Kompensatoren viel zuverlässigere Resultate. Da ferner in hliffen von der ungefähren Dicke von 0,01 *mm* die meisten Mineralien diesen wenig prägnanten grauen Tönen polarisieren, erscheint es für gehnliche Untersuchungen nicht zweckmäfsig, wenn die Dünnschliffe allzu nn angefertigt werden, weil in diesem Falle das wichtige Mittel zur terscheidung der Mineralien, welches in den Polarisationsfarben gegeben ist, loren geht.

Die Bestimmung der Doppelbrechung aus den Interferenzben wird im Dünnschliff auch dadurch weniger genau, dafs nur nahmsweise genau orientierte Durchschnitte vorliegen. Um den terschied in der Geschwindigkeit der beiden Strahlen in einem isch einachsigen Mineral bestimmen zu können, ist es notndig, einen Durchschnitt des betreffenden Minerals parallel zur ischen Achse zu haben, da nur in diesem der aufserordentliche hl mit seinem wahren Werte erscheint.

Von allen Durchschnitten eines optisch einachsigen Minerals in einem Schliffe wird der Schnitt parallel zur optischen Achse die höchsten Interferenzfarben zeigen; die Farben werden um so niederer, je gröfser die Neigung des Schnittes zur Achse ist, bis bei einer Neigung von 90° überhaupt keine Einwirkung auf das parallele polarisierte Licht mehr eintritt. Schnitte von optisch einachsigen Mineralien senkrecht zur optischen Achse verhalten sich im parallelen polarisierten Licht wie isotrope Körper.

Unter den verschiedenen Durchschnitten eines zweiachsigen Krystalls zeigt der Schnitt parallel zur Achsenebene die höchsten Interferenzfarben, da hier das Maximum und das Minimum der Lichtgeschwindigkeit in Frage kommen; in einem Schnitt senkrecht zur ersten Bisektrix wird eine um so niederere Interferenzfarbe auftreten, je kleiner der Winkel der optischen Achsen ist. In allen Fällen ist die Interferenzfarbe in einem solchen Schnitt niederer als in einem Schnitt senkrecht zur zweiten Mittellinie, dessen Interferenzfarbe sich um so mehr derjenigen im Schnitte parallel zur Achsenebene nähert, je gröfser der stumpfe Achsenwinkel ist. In einem Schnitt senkrecht zu einer Achse endlich pflanzen sich beide Strahlen mit gleicher Geschwindigkeit fort, sie erleiden somit keine Verzögerung gegeneinander und zeigen auch keine Interferenzfarbe. Infolge der sogen. konischen Refraktion aber, welche in zweiachsigen Krystallen in der Richtung der optischen Achse auftritt, erscheinen solche Schnitte zwischen gekreuzten Nicols hell und bleiben gleichmäfsig hell bei einer vollen Umdrehung des Schliffes um 360°. Diese durch die konische Refraktion hervorgebrachte Erscheinung ist um so weniger deutlich, je dünner der Schliff und je geringer die Doppelbrechung des Krystalls. ist; sie ist in dünnen Schnitten sehr schwach doppelbrechender Krystalle überhaupt nicht mehr erkennbar, und solche Durchschnitte erscheinen daher im parallelen polarisierten Licht gleichmäfsig dunkel.

Schneiden wir aus einem Krystall einen dünnen Keil und betrachten diesen im weifsen, parallelen, polarisierten Licht, so beobachten wir, da bei gleicher Doppelbrechung die Interferenzfarben nur von der Dicke abhängig sind, in parallelen Streifen nebeneinander die verschiedenen Farbenordnungen. Solche Keile dienen einesteils zum Studium der Interferenzfarben für den Anfänger, welcher eine Übung in der Unterscheidung der verschiedenen Ordnungen gewinnen will, da selbst die besten und mit den modernsten Mitteln ausgeführten Reproduktionen der Interferenzfarben die Eigenschaften derselben nur sehr

unvollkommen wiedergeben. Zum Zwecke solcher Studien eignen sich am besten Keile von Quarz, welche so geschliffen sind, dafs sie bei einer Länge von ca. 8 *cm* die vier ersten Farbenordnungen geben. Die weiteren Ordnungen kann man leicht entbehren, da die über die vierte Ordnung hinausgehenden Farben sich schon sehr dem Weifs höherer Ordnung nähern. Man beobachtet solche Präparate am besten zwischen zwei Sätzen von Glasplatten, welche man so gegeneinander stellt, dafs die eine um ihren Polarisationswinkel gegen die andere gedreht ist. Man legt nun den Keil unter 45° gegen die Einfallsebene des Lichtes auf die eine Glasplatte und blickt schief durch die andere. Das durch Reflexion polarisierte Licht, welches die eine Glasplatte liefert, schwingt senkrecht zur Einfallsebene des Lichtes (vgl. S. 10), während das durch Brechung polarisierte, welches durch die zweite hervorgebracht wird, seine Schwingungen parallel zur Einfallsebene ausführt, so dafs dieser einfache Apparat Beobachtungen „zwischen gekreuzten Nicols" bei einem beliebig grofsen Gesichtsfeld auszuführen gestattet. Andernteils dienen solche Keile auch als Kompensatoren zu zahlreichen mikroskopischen Untersuchungen.

Die Interferenzstreifen, welche an keilförmigen Schichten innerhalb der Präparate auftreten, dienen in nicht wenigen Fällen bei der mikroskopischen Untersuchung von Dünnschliffen und isolierten Krystallen zur sicheren Bestimmung der Höhe der Interferenzfarben, und auch als Hilfsmittel bei der Definition einer Krystallform sind sie nicht selten von ziemlichem Werte. Keilförmige Partieen bilden sich in den Dünnschliffen teils durch Abblättern eines gut spaltbaren Minerals, teils dadurch, dafs die Grenzen eines Individuums ziemlich schief zur Richtung des Schliffes liegen, teils endlich am Rande des Schliffes, welcher meist etwas dünner ist. Man kann dann von der dünnsten Stelle an, an welcher man die Farben niederer Ordnungen bemerkt, die sich folgenden Farbenstreifen einfach abzählen und z. B. konstatieren, wie oft unter denselben das Rot wiederkehrt, bis man die Interferenzfarbe im Hauptteile des Durchschnittes erreicht hat. Diese durch keilförmige Schnitte hervorgebrachten Farbenbänder führen bei schief getroffenen Zwillingslamellen stärker doppelbrechender Mineralien öfters zu dem Irrtum, als läge eine ganze Reihe solcher Lamellen vor, während es sich thatsächlich nur um eine einzige schief getroffene handelt. Ein Beispiel dieser Erscheinung giebt Fig. 60, welche einen Augitkrystall mit einer einzigen schief hindurchsetzenden Zwillingslamelle darstellt.



Fig. 60.
Einfache Zwillingslamelle in Augit.

An isolierten Krystallen dienen die an den keilförmig zulaufenden Rändern auftretenden Interferenzfarben sehr häufig als wichtiges Hilfsmittel bei der Ermittlung der Krystallform, wie sich z. B. aus den Interferenzstreifen an dem künstlichen Krystall von Vitriolbleierz in Fig. 61 (S. 74) dessen Form ziemlich leicht ableiten läfst. Sie dienen aber ferner auch zur approximativen Bestimmung der Doppelbrechung. Beobachtet man an



Fig. 61.
Künstlicher Krystall von Vitriolbleierz zwischen gekreuzten Nicols.

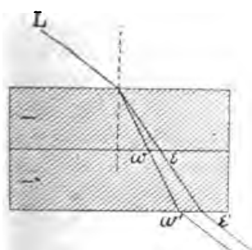
Krystallen mit ziemlich flach gegeneinander geneigten Randflächen sehr enge Streifen, so handelt es sich sicher um eine sehr stark brechende Substanz u. s. w.

Endlich trifft man hin und wieder Krystalle, welche beim Drehen zwischen gekreuzten Nicols überhaupt nicht auslöschen, sondern einen Wechsel verschiedener Farben zeigen. Dies kann in einzelnen, aber ziemlich seltenen Fällen von einer starken Dispersion der Schwingungsrichtungen herrühren (vgl. S. 69) oder aber davon, dafs Zwillingskrystalle vorliegen, deren Verwachsungsebene parallel zur Ebene des Mikroskoptisches ist, wobei die Schwingungsrichtungen der beiden Individuen eine schiefe Lage gegeneinander aufweisen. Wenn dann die Schwingungsrichtungen des einen parallel zu den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols sind, erscheint nur die Interferenzfarbe des andern, und umgekehrt, während in den Zwischenstellungen Übergangsfarben zwischen diesen beiden vorhanden sind. Die Unterscheidung der beiden Fälle findet man im monochromatischen Licht, in welchem volle Auslöschung eintritt, wenn die Ursache des Farbenwechsels in der Dispersion der Schwingungsrichtungen begründet ist, dagegen keine Auslöschungsstellung gefunden werden kann, wenn es sich um Zwillinge handelt.

4. Bestimmung der relativen Geschwindigkeit der beiden Strahlen. Charakter der Doppelbrechung. Kompensatoren.

Die Höhe der Interferenzfarben ist abhängig von der Verzögerung, welche der eine Strahl gegen den andern beim Durchgang durch einen doppelbrechenden Krystall erleidet. In einer parallel zur optischen Achse geschnittenen Platte eines optisch einachsigen, negativen Minerals z. B. wird der parallel zur optischen Achse schwingende aufserordentliche Strahl dem ordentlichen, welcher senkrecht zu dieser Achse schwingt, um eine bestimmte Gröfse vorauseilen, bezw. weniger stark abgelenkt werden. Legen wir auf diese erste Platte eine zweite eines ebenso orientierten Krystalls in paralleler Stellung, so wird derjenige Strahl, welcher in der ersten mit gröfserer Geschwindigkeit und kleinerer Lichtbrechung sich fortpflanzte, auch in der zweiten der weniger stark

gebrochene und somit der schnellere sein, wie dies Fig. 62 darstellt, während der andere auch in der zweiten sich mit geringerer Geschwindigkeit bezw. gröſserer Lichtbrechung fortbewegt. Die Phasendifferenz der beiden Strahlen wird also beim Austritt aus dem zweiten Krystall gleich der Summe der Verzögerung in jedem einzelnen sein, oder: die Doppelbrechung zweier Krystalle und damit die Interferenzfarben addieren sich, wenn gleichwertige Schwingungsrichtungen parallel liegen.



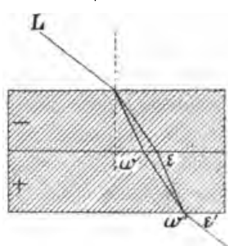


Fig. 62. Addition — Fig. 63. Kompensation der Doppelbrechung.

Drehen wir nun den einen der beiden Krystalle um 90°, oder fügen wir, wie dies in Fig. 63 dargestellt ist, statt der zweiten negativen eine Platte eines optisch positiven Krystalls hinzu, so wird derjenige Strahl, welcher in der ersten mit gröſserer Geschwindigkeit und kleinerer Brechung sich bewegte, in der zweiten mit kleinerer Geschwindigkeit und gröſserer Lichtbrechung sich fortpflanzen, und das Entgegengesetzte gilt für den andern Strahl. Die Phasendifferenz, welche die beiden Strahlen beim Austritt aus dieser Kombination aufweisen, wird somit gleich der Differenz der Verzögerung in jedem einzelnen sein, oder: die Doppelbrechung zweier Krystalle und damit die Interferenzfarben kompensieren sich, wenn gleichwertige Schwingungsrichtungen zu einander gekreuzt liegen. Ist die Verzögerung in der einen Platte gleich der Verzögerung in der andern, so wird die Kombination derselben in gekreuzter Stellung wirken wie ein optisch isotroper Körper, d. h. die Doppelbrechung des einen hebt die Doppelbrechung des andern vollständig auf, wie dies Fig. 63 darstellt. Auf dieser Erscheinung beruht die Verwendung der sogen. Kompensatoren, welche zum Teil dazu dienen, durch Erhöhung bezw. Erniedrigung der Interferenzfarben den Charakter der Doppelbrechung und gleichzeitig die ungefähre Höhe der Interferenzfarben zu bestimmen, zum Teil aber auch eine genaue Messung der Interferenzfarben durch vollkommene Kompensation ermöglichen. Die wichtigsten derselben sind:

1. das Viertelundulationsglimmerplättchen;
2. die Plättchen mit Violett I, II etc.;
3. der Glimmerkeil;
4. der Quarzkeil;
5. das Birefraktometer;
6. der Babinetsche Kompensator;
7. der Zwillingskompensator.

Von diesen Nebenapparaten werden die unter 1 und 2 genannten zweckmäfsig jedem, selbst dem einfachsten, Polarisationsmikroskop beigegeben, während die übrigen mehr zu Spezialuntersuchungen verwendet werden. Die drei zuletzt genannten Kompensatoren werden gewöhnlich in besondere Okulare eingefügt, in welchen sie durch eine Schraubenbewegung verstellbar sind. Man mufs, wenn man sich derselben bedient, unter Ausschaltung des Innennicols einen auf das Okular aufsetzbaren Analysator verwenden. Die übrigen werden einfach zwischen dünne länglich-rechteckige Glasplatten eingekittet und in der Weise gebraucht, dafs man sie in den über dem Objektiv befindlichen Schlitz (oder, bei älteren Modellen mit aufsetzbarem Analysator, in den

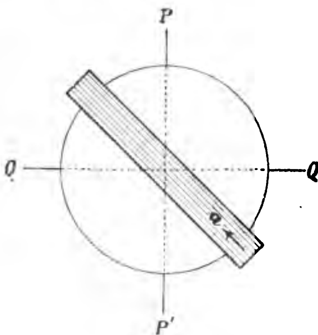


Fig. 64.
Kompensator mit paralleler Schwingungsrichtung.

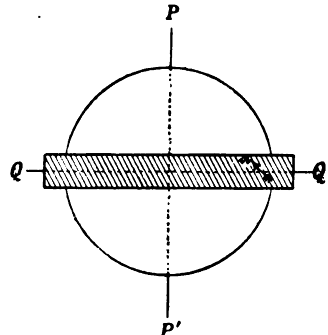


Fig. 65.
Kompensator mit diagonaler Schwingungsrichtung.

Schlitz oberhalb des Okulars) einsteckt. Die betreffenden Öffnungen sind zum Teil so angebracht, dafs die Längsrichtung der Plättchen unter 45° zu den Schwingungsrichtungen der Nicols zu liegen kommt, zum Teil in der Weise, dafs die Kanten des Plättchens den Nicols parallel sind. Da in allen Fällen die Schwingungsrichtungen in den Kompensatoren 45° mit den Schwingungsrichtungen der Nicols bilden müssen, so müssen dieselben für diese verschiedenen Vorrichtungen in verschiedener Weise angefertigt werden. Im ersteren Falle liegen die Schwingungsrichtungen parallel zu den Kanten des Rechteckes, es kann dann die Richtung gröfserer oder kleinerer Schwingungsgeschwindigkeit der Längsrichtung parallel gehen. Die Viertelundulationsplättchen wurden früher fast stets in der Weise angefertigt, dafs die kleinste Geschwindigkeit der Längsrichtung entsprach, die andern Plättchen fertigte man mit entgegen-

gesetzter Orientierung (Fig. 64). Um den sich daraus ergebenden zahlreichen Verwechslungen vorzubeugen, orientiert man heute auch die Viertelundulationsplättchen in derselben Weise oder, noch besser, man konstruiert alle in der in Fig. 65 dargestellten Weise, wo die Schwingungsrichtungen 45° mit den Kanten des Plättchens bilden. Auf diesen markiert man die Richtung gröfster Geschwindigkeit a mit einem Diamant und hat noch den weiteren Vorteil, dafs man, um eine Vertauschung der beiden Hauptschwingungsrichtungen hervorzubringen, das Plättchen einfach um 180° zu drehen braucht, während der zu beobachtende Krystall selbst unbewegt bleibt.

Es können die Kompensatoren natürlich aus jedem farblosen, doppelbrechenden Material hergestellt sein, im allgemeinen benutzt man dazu Gips, Glimmer und Quarz.

1. Das Viertelundulationsglimmerplättchen ist ein dünnes Spaltungsplättchen von farblosem Glimmer, welches eine Verzögerung der beiden Strahlen um ca. $^1/_4$ Wellenlänge von Natriumlicht, also um ca. 150 $\mu\mu$ hervorbringt. Dasselbe giebt zwischen gekreuzten Nicols für sich betrachtet das Graublau erster Ordnung (vgl. Fig. 58), zwischen parallelen Nicols ein Bräunlichweifs. In manchen Fällen sollen auch Plättchen gute Dienste thun, welche nur eine Verzögerung von $^1/_8\ \lambda$ für Natriumlicht hervorbringen. Wenn man die verschiedenen Kompensatoren orientieren will, so benutzt man dazu stets das Viertelundulationsglimmerplättchen, welches im konvergenten Licht das Achsenbild des optisch zweiachsigen Glimmers giebt. Da der Glimmer stets optisch negativ ist, so entspricht die Richtung der Achsenebene der Richtung kleinster Schwingungsgeschwindigkeit.

2. Die Kompensatoren mit Violett I, II etc. wurden schon bei den Stauroskopen beschrieben; ihre ausgedehnte Benutzung als Kompensatoren rechtfertigt hier eine Wiederholung. Das Violett I wird wohl am meisten zur Bestimmung des Charakters der Doppelbrechung angewandt, das Violett II und weitere Plättchen mit noch höheren Interferenzfarben nur dann, wenn es sich um recht stark doppelbrechende Substanzen handelt. Man fertigt dieselben meist aus Gips oder Quarz an.

3. Der Glimmerkeil (Fig. 66) besteht aus 16 gleich dicken, übereinander geschichteten Glimmerplättchen, von welchen jedes eine Verzögerung von $^1/_4$ Farbenordnung hervorbringt, und immer das nächst höhere um ein bestimmtes Stück kürzer ist als das darunter liegende. Man hat in diesem Apparat die



Fig. 66. Der Glimmerkeil.

vier ersten Farbenordnungen in 16 Abstufungen zur Verfügung, wobei jede dieser Abstufungen so breit gemacht wird, dafs das ganze Gesichtsfeld des Mikroskops jedesmal eine einheitliche Interferenzfarbe aufweist.

4. Der Quarzkeil ist ein keilförmig geschnittenes schmales Quarzplättchen, welches mit einer Teilung versehen ist, die an jeder Stelle die entsprechende Verzögerung angiebt. Man verschiebt denselben in dem Schlitz über dem Objektiv so lange, bis durch Kompensation der Interferenzfarben entweder volle Dunkelheit oder noch besser das empfindliche Violett I erreicht ist, liest die Dicke des Quarzes an dieser Stelle ab und kann daraus die Doppelbrechung des Krystalls berechnen.

5. Das Birefraktometer besteht aus einem Okular, innerhalb dessen mit Schraube und Trieb ein Quarzkeil verschoben werden kann; eine Mikrometerteilung, welche an jeder Stelle die Dicke des zur Verwendung kommenden Teiles des Keils direkt abzulesen gestattet, ist auf dem Glasstreifen eingeritzt, welcher den Keil bedeckt, und man kann somit jederzeit gleichzeitig mit der Einstellung selbst die Dicke des Keils bestimmen. Noch besser wird dies erreicht, wenn man den Quarzkeil so anfertigt, dafs er nur die eine Hälfte des Gesichtsfeldes bestreicht, während die Teilung auf der andern Hälfte angebracht ist, und in dieser Zusammenstellung findet der Apparat nicht nur als Kompensator, sondern auch als Komparator Verwendung, indem man den Krystall in die freie Hälfte des Gesichtsfeldes einstellt und seine Interferenzfarbe mit den Farben des verschiebbaren Keils vergleicht. Doch genügen diese letzteren Bestimmungen nur für eine allgemeine Orientierung.

6. Der Babinetsche Kompensator (Fig. 67) besteht aus zwei flachen, übereinander liegenden Quarzkeilen von gleichem brechenden Winkel. Bei dem einen Keil liegt die optische Achse parallel, bei dem andern senkrecht zur scharfen Kante. Der obere Keil ist nicht beweglich, während der untere verschiebbar ist und seine Bewegung durch Zahn und Trieb an einer Trommel abgelesen werden kann. In der Nullstellung ist in der Mitte des Gesichtsfeldes, welche durch ein scharfes Fadenkreuz (sogen. Andreaskreuz) markiert ist, ein schwarzes Band vorhanden, da dort die beiden Keile, in welchen gleichwertige Richtungen ge-

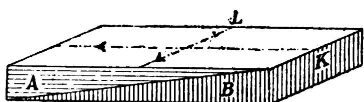


Fig. 67. Babinetscher Kompensator.

kreuzt sind, gleich dick sind und sich ihre Doppelbrechung somit vollständig kompensiert. Nach beiden Seiten symmetrisch sieht man in aufsteigender Reihenfolge Bänder mit den verschiedenen Ordnungen der Interferenzfarben. Schiebt man nun eine doppelbrechende Platte ein, so wird das schwarze Band aus der Mitte entfernt. Man verschiebt dann den beweglichen Keil mittels seiner Schraube so lange, bis das schwarze Band wieder genau in der Mitte liegt, und liest auf der Trommel das Mafs der Verschiebung ab. Dreht man hierauf den Krystall um 90°, so entfernt sich das schwarze Band nach der entgegengesetzten Seite; es wird abermals in das Fadenkreuz eingestellt, und das Mittel beider Ablesungen giebt ein Mafs für die Doppelbrechung des Krystalls. Da im monochromatischen Licht auch an Stelle der farbigen Bänder schwarze treten, mufs die grobe Einstellung des zentralen Bandes im weifsen Licht gemacht werden; dieselbe wird aber zweckmäfsig im Natriumlicht kontrolliert.

7. Der Zwillingskompensator besteht aus zwei um 180° gegeneinander gedrehten Babinetschen Kompensatoren, in welchen die beiden beweglichen Keile gleichzeitig, aber in entgegengesetzter Richtung beweglich sind. Beim Zwillingskompensator erscheinen gleich weit nach beiden Seiten hinausgerückt zwei schwarze Bänder, welche durch die Bewegung der Schraube in der Mitte vereinigt werden können, so dafs hierdurch eine äufserst exakte Bestimmung ermöglicht wird.

Man bedient sich all dieser Kompensatoren in der Weise, dafs man zuerst den zu untersuchenden Krystall zentriert und mit seinen Schwingungsrichtungen unter 45° zu denjenigen der Nicols einstellt. Aufser beim Arbeiten mit dem Babinetschen und dem Zwillingskompensator, deren Handhabung oben skizziert wurde, beobachtet man zuerst die Interferenzfarbe des zu untersuchenden Objektes, schiebt dann den Kompensator ein und sieht zu, in welcher Richtung eine Veränderung der Interferenzfarbe vor sich ging, d. h. ob die Interferenzfarbe der Kombination der Summe oder der Differenz der Verzögerungen im Kompensator einesteils, im Krystall andernteils entspricht. Haben wir z. B. einen prismatischen, optisch einachsigen, negativen Krystall vor uns und orientieren denselben so auf dem Tisch des Mikroskops, dafs seine Längsrichtung mit der Richtung gröfster Schwingungsgeschwindigkeit in dem Kompensator zusammenfällt, so steigt die Interferenzfarbe; man hat den Eindruck, als wäre der Krystall dicker geworden, im entgegengesetzten Fall findet eine Erniedrigung der Interferenzfarbe statt, als ob jetzt eine dünnere Schicht vorliegen würde. Eine scheinbare Ausnahme ergiebt sich nur bei solchen Krystallen, welche für sich sehr niedere Interferenzfarben aufweisen. Ein Krystall z. B., der für sich das Graublau erster Ordnung zeigt und welcher durch das Violett I

in gekreuzter Stellung kompensiert wird, zeigt eine lebhaft orangegelbe Interferenzfarbe, welche aber trotzdem Subtraktion bedeutet, da sie niederer ist als das Violett I. Man überzeugt sich davon am besten, wenn man den Krystall um 90° dreht: dann tritt das höhere Blau zweiter Ordnung auf. Im allgemeinen wissen wir aber nach der einfachen Betrachtung im parallelen polarisierten Lichte nicht, dafs der beobachtete Krystall optisch einachsig und prismatisch ausgebildet ist. Wir können nur feststellen, dafs parallel zu seiner Längsrichtung, seiner Hauptzone, die Richtung gröfster Schwingungsgeschwindigkeit vorhanden ist, und man bezeichnet daher die Bestimmung der relativen Geschwindigkeit der beiden in einem Durchschnitt schwingenden Strahlen als die Bestimmung des optischen Charakters der Hauptzone, wobei man als Hauptzone einfach diejenige Richtung nimmt, nach welcher ein Krystall oder Krystalldurchschnitt verlängert erscheint. Negativ ist dieser, wenn die Richtung gröfster, positiv, wenn diejenige kleinster Schwingungsgeschwindigkeit der Hauptzone parallel ist.

Aufserdem dient der Fedorowsche Glimmerkeil und das Birefraktometer noch zur genauen quantitativen Bestimmung der Höhe der Interferenzfarben durch Kompensation. Zu diesen Ermittlungen müssen gleichwertige Richtungen im Krystall und im Kompensator zunächst in gekreuzte Stellung gebracht werden. Nun schiebt man den Keil so weit ein, bis die Interferenzfarbe des Krystalls sehr annähernd kompensiert ist, verschiebt bei Benutzung des Birefraktometers den Keil sehr langsam, bis vollständige Dunkelheit eintritt; bei Verwendung des Glimmerkeils schiebt man den nächstdickeren Abschnitt ein und beobachtet, welche der beiden Interferenzfarben der Dunkelstellung am nächsten kommt. Man kann so in letzterem Falle noch leicht ein Viertel des Wertes eines Abschnittes des Keils schätzen und erhält nach beiden Methoden ein ziemlich exaktes Mafs für die Höhe der Interferenzfarbe, dessen Zuverlässigkeit die Bestimmung mittels des Komparators vielfach übertrifft.

Die Bestimmung des optischen Charakters der Hauptzone liefert ein brauchbares Hilfsmittel für die Bestimmung der Krystalle, welches zumal bei der Untersuchung von Dünnschliffen vielfach verwertbar ist, indem durch Vergleichung des optischen Charakters der Hauptzone mit dem wahren optischen Charakter des Krystalls ein Hinweis auf seine krystallographische Ausbildung, auf die Lage der optischen Achsenebene etc. gegeben ist.

Das oben angeführte Beispiel zeigt, dafs bei einem optisch einachsigen Krystall, dessen Hauptachse gleichzeitig der Hauptzone entspricht, der optische Charakter der letzteren gleich dem optischen Charakter des Krystalls ist. Ist der betreffende optisch einachsige, negative Krystall parallel zur Basis taflig, so beobachten wir in einem Querschnitt auch eine bezeichnende Verlängerung, zu welcher aber die Hauptachse senkrecht steht, d. h. wir haben jetzt die Richtung kleinster Schwingungsgeschwindigkeit parallel zur Hauptzone, deren Charakter somit positiv ist. Es ergiebt sich für die Unterscheidung der verschiedenen Möglichkeiten folgende Tabelle, wo unter I der wahre optische Charakter des Krystalls, unter II derjenige der Hauptzone gegeben ist:

	Optisch einachsig.	
— [illegible] —	prismatische Ausbildung	[illegible]
— [illegible] —	tafelige Ausbildung	[illegible]
	Optisch zweiachsig.	
— [illegible] —	prismatisch: erste Bisektrix parallel zur Hauptzone, tafelig: zweite Bisektrix senkrecht zur Tafelfläche.	[illegible]
— [illegible] —	prismatisch: zweite Bisektrix parallel zur Hauptzone, tafelig: erste Bisektrix senkrecht zur Tafelfläche.	[illegible]
— [illegible] —	prismatisch: Achsenebene senkrecht zur Hauptzone, tafelig: Achsenebene parallel zur Tafelfläche.	

In den verschiedenen Durchschnitten durch eine optisch zweiachsige Substanz beobachtet man wechselnden Charakter der Doppelbrechung, wenn die eine Schwingungsrichtung in allen charakteristischen Durchschnitten die optische Normale ist.

Häufig stellen sich Unzulänglichkeiten bei der Bestimmung des Charakters der Hauptzone ein, weil entweder eine wirklich charakteristisch hervortretende Hauptzone nicht zu erkennen ist, oder weil das Weiß höherer Ordnung als Interferenzfarbe auftritt. Im ersteren Fall kann man von einem Charakter der Hauptzone überhaupt nicht sprechen, im letzteren muß man nach Abhilfe suchen. Entweder benutzt man dann keilförmig zulaufende Ränder des Krystalls oder Schliffes und führt die gewöhnlichen Methoden der Kompensation an den lebhaften Farbenstreifen durch, welche hier auftreten, oder man verwendet Kompensatoren, welche selbst schon den höheren Farbenordnungen entsprechen und mittels deren es gelingt, durch Subtraktion die lebhaften Interferenzfarben der niederen Ordnungen hervorzubringen. Zu bemerken ist, daß eine Interferenzfarbe, welche über die fünfte, für besonders geübte Beobachter vielleicht über die sechste Ordnung hinausgeht, als Weiß höherer Ordnung erscheint.

Die Beobachtungen im konvergenten polarisierten Licht.

In zahlreichen Fällen ist es von Wichtigkeit, die optische Beschaffenheit von Krystallen oder Krystalldurchschnitten nicht nur in einer, sondern in möglichst verschiedenen Richtungen zu studieren. Man verwendet dazu entweder das konvergente polarisierte Licht, mittels dessen man die optischen Erscheinungen der Krystalle in verschiedenen Richtungen gleichzeitig überblicken kann, oder die im Anhange zu besprechenden Drehapparate, welche das Studium verschiedener Richtungen nacheinander gestatten.

Den Strahlengang des konvergenten Lichtes zeigt Fig. 68 (S. 82). Die Linsen L und L' sind so angeordnet, daß der obere Brennpunkt von L mit dem unteren von L' in f zusammen-

gilt. Zwischen beiden Linsen befindet sich der zu untersuchende Krystall *K*. Jeder der Beleuchtungskegel, welche ihre Spitze in der



Fig. 68.
Strahlengang im konvergenten Licht.

unteren Brennebene *F* der Linse *L* haben, wird durch diese Linse in ein Bündel paralleler Strahlen umgewandelt, die in jeder innerhalb des Öffnungswinkels der Linse möglichen Neigung gegen die Achse austreten. Diese parallelen Bündel durchsetzen das zwischen beiden Linsen liegende Objekt und werden in der oberen Brennebene *F'* von *L'* wieder punktweise vereinigt.

In dem so zu stande kommenden Bild entspricht somit jeder Punkt einer bestimmten Richtung in dem Krystall, und wir beobachten im konvergenten Licht nebeneinander und gleichzeitig die optischen Erscheinungen, welche das betreffende Objekt in allen Fortpflanzungsrichtungen aufweist, in welchen dasselbe von den Lichtbündeln durchsetzt wird.

Wenden wir statt des gewöhnlichen Lichtes durch den Polarisator *P* und den Analysator *A* polarisiertes Licht an, so werden, wenn es sich um einen doppelbrechenden Krystall handelt, an jedem Punkte des Bildes Interferenzerscheinungen sichtbar werden, welche der Verzögerung des einen Strahls gegen den andern beim Durchgang durch den Krystall in der betreffenden Richtung entsprechen. Die so entstehenden Interferenz- oder Achsenbilder sind eines der wichtigsten Hilfsmittel, um die optische Beschaffenheit eines Krystalls zu erkennen.

Die beiden einfachen Linsen *L* und *L'* werden heutzutage durch Kombinationen plankonvexer Linsen ersetzt oder in dem speziellen Fall, welcher hier zu betrachten ist, einesteils durch den über dem Polarisator angebrachten Beleuchtungsapparat, anderenteils durch ein beliebiges Objektiv, welches die Stelle der Linse *L'* einnimmt.

Die einfachste Methode, um am Mikroskop von der Beobachtung des Objektivs zu derjenigen des Interferenzbildes überzugehen, besteht somit darin, dafs man nur das Okular entfernt und im polarisierten Licht die von dem Objektiv allein gelieferten Interferenzerscheinungen betrachtet, welche in Form eines kleinen Bildes in der oberen Brennebene des Objektivs sichtbar werden ·lxsche Methode). Bei dieser Art der Beobachtung findet

eine Umdrehung des Bildes nicht statt; das zur Beobachtung gelangende Interferenzbild hat somit die gleiche Lage wie das Objekt, ist aber gegen das mikroskopische Bild desselben verwendet. Die bei dieser Methode entstehenden Bilder sind im allgemeinen sehr klein, dabei aber von grofser Schärfe. Man kann dieselben nun selbstverständlich auch wieder vergröfsern, wobei aber ein Teil der Schärfe verloren geht. Am einfachsten stellt man aus dem Okular und einer in den Tubus eingeschobenen Hilfslinse (Bertrandsche Linse) ein Hilfsmikroskop her, welches durch Verschiebung des Einsatzrohres im Tubus auf das kleine Interferenzbild eingestellt werden kann und von diesem ein virtuelles Bild liefert, welches man durch das Okular beobachtet. Das so beobachtete Bild ist gegen das erste sowie gegen das Objekt verwendet und besitzt dieselbe Lage wie das mikroskopische Bild des Objektes. Die richtige Zentrierung der Bertrandschen Linse sollte stets im Anfang genau kontrolliert werden, indem man einen nach der Basis tafligen, optisch einachsigen Krystall im Mikroskop einstellt. Ist die Lage der Linse richtig, so mufs das später zu besprechende schwarze Kreuz mit dem Fadenkreuz des Okulars zusammenfallen. Man kann aber das Achsenbild auch noch in der Weise vergröfsern, dafs man eine in einer Fassung verschiebbare Lupe über dem Okular anbringt (Kleinsche Lupe). Man erhält so ebenfalls ein virtuelles Bild in einer gegen das Objekt verwendeten Lage. Ein für Projektion und Photographie geeignetes reelles Bild endlich erhält man durch Anwendung einer Bertrandschen Linse ohne Okular oder mit einem Projektionsokular; auch das so entstehende Bild ist gegen das Objekt verwendet.

Das zur Beobachtung kommende Achsenbild erscheint um so kleiner, je stärker das gebrauchte Objektiv ist; da aber mit der Vergröfserung im allgemeinen auch die Apertur des Systems zunimmt, so erhält man bei Anwendung stärkerer Objektive stärker konvergente Strahlenbündel. Das entstehende Achsenbild gestattet somit beim Gebrauch stärkerer Objektive sehr viel weiter gegeneinander geneigte Richtungen zu studieren, vorausgesetzt dafs die Apertur des Beleuchtungsapparates für diejenige des Objektivs ausreicht. Daraus folgt, dafs man bei mikroskopischen Beobachtungen im konvergenten Licht stets den Kondensor einlegt und ein möglichst starkes Objektiv[1] anwendet.

[1] Es mag hier erwähnt werden, dafs man das konvergente Licht, wenn ein solches Objektiv fehlt, auch mittels eines kleinen Luftbläschens im Kanadabalsam, durch Seifenschaum u. s. w. hervorbringen kann, wobei man dann mittels des Mikroskops das durch die Luftblase als Linse L' hervorgebrachte Interferenzbild vergröfsert beobachtet.

In Figur 69 sind einige der gebräuchlichen Objektive nach Modellen von W. und H. Seibert im Durchschnitt abgebildet, wobei $2u$ deren Öffnungswinkel bedeutet. Figur 70 zeigt das jedem derselben entsprechende Achsenbild eines optisch zweiachsigen Minerals mit einem Achsenwinkel von ca. 80°.

Da jeder Punkt des Interferenzbildes einer bestimmten Richtung in dem Krystall und nicht einer bestimmten Stelle desselben entspricht, bleibt das Achsenbild unverändert, wenn man einen homogenen Krystall zwischen den beiden Linsensystemen verschiebt.

Ist endlich die Apertur des Beleuchtungsapparates nicht ausreichend für das Objektiv, so sieht man nur den inneren Teil des Bildes beleuchtet, während sein Rand dunkel erscheint. Handelt es sich darum, in einem Gemenge zahlreicher winziger Individuen einzelne derselben im konvergenten polarisierten Licht zu untersuchen, oder besteht ein Krystall aus vielen schmalen Zwillingsindividuen, deren optische Natur erkannt werden soll, so bedient man sich einer Blende, damit nur das Licht, welches durch den in der Mitte des Gesichtsfeldes befindlichen Teil des Objektes hindurchgegangen ist, in das Auge gelange. Beobachtet man ohne Okular, so ist die einfachste Methode die, dafs man nach genauer Zentrierung des betreffenden Teils und Entfernung des Okulars ein mit kleiner Durchbohrung versehenes Diaphragma auf das Rohr des Tubus auflegt. Oder aber man macht die Einstellung des Objektes mit einem Ramsdenschen Okular, in dessen unterer Brennebene eine Irisblende vorhanden ist. Man zieht dann bei parallelem Licht die Blende so weit zu, dafs nur noch die zu untersuchende Partie sichtbar ist, und entfernt das Okular, während die Irisblende im Tubus sitzen bleibt. Bei Beobachtungen nach der Bertrandschen Methode bringt man die Irisblende am besten in der hinteren Brennebene der Hilfslinse an, welche in den Tubus eingeschoben wird.

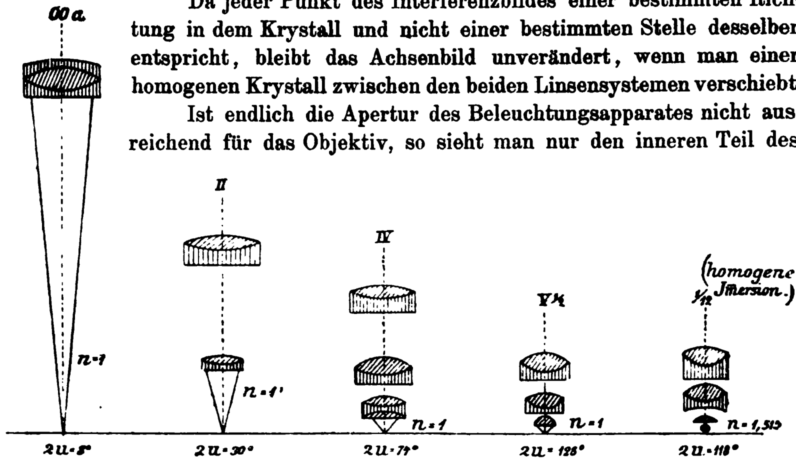


Fig. 69. Objektive von W. und H. Seibert.

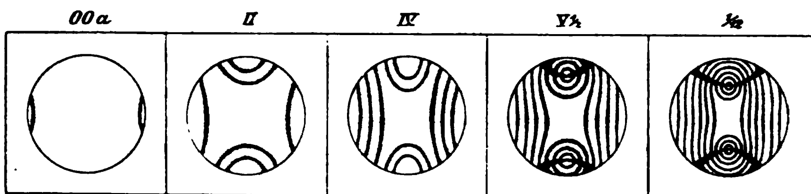


Fig. 70. Achsenbilder entsprechend den Objektiven in Fig. 69.

1. Das Verhalten optisch einachsiger Krystalle im konvergenten polarisierten Licht.

Betrachten wir zunächst die Erscheinungen näher, welche eine senkrecht zur Achse geschnittene Platte eines optisch einachsigen Krystalls im konvergenten polarisierten Lichte zeigt. Unter den zahlreichen Bündeln paralleler Strahlen ist eines *AA'* in Fig. 71, welches die Platte senkrecht, d. h. parallel zur optischen Achse, durchsetzt, das gleichzeitig das Zentrum des ganzen Strahlenkegels bildet. Da in der Richtung der optischen Achse Doppelbrechung nicht stattfindet, wird somit die Mitte des Interferenzbildes dunkel erscheinen. Untersuchen wir ein zweites Strahlenbündel *A'm*, welches den Krystall wenig schief zu seiner Achse durchsetzt, so wird das in dieser Richtung hindurchgehende Licht zerlegt in zwei Schwingungen, von welchen eine im Hauptschnitt, die andere senkrecht dazu stattfindet. Dieselben treten entsprechend der geringen Neigung gegen die Achse mit einer kleinen Phasendifferenz aus dem Krystall aus, und es erscheint eine schwache Aufhellung. Für weitere Strahlenbündel *A'l*, welche stärker gegen die Achse geneigt den Krystall durchsetzen, wird entsprechend dieser gröfseren Neigung auch die Verzögerung bedeutender sein, es wird also von der Mitte gegen den Rand des Bildes zu eine fortwährende Steigerung der Interferenzfarben stattfinden. Da aber alle gegen die Achse gleich geneigten Strahlen auch die gleiche Verzögerung aufweisen, so werden die verschiedenen Interferenzfarben in konzentrischen Ringen um den dunkeln Mittelpunkt auftreten, welche am lebhaftesten aufleuchten in denjenigen Hauptschnitten, die 45° mit den Schwingungen der beiden Nicols bilden. In denjenigen Hauptschnitten dagegen, welche mit den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols zusammenfallen, wird eine Zerlegung des Lichtes nicht eintreten. Sie bleiben somit unter allen Umständen dunkel. So beobachtet man ein schwarzes Kreuz, dessen Arme stets den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols parallel sind und das die konzentrischen Ringe durchschneidet, welche

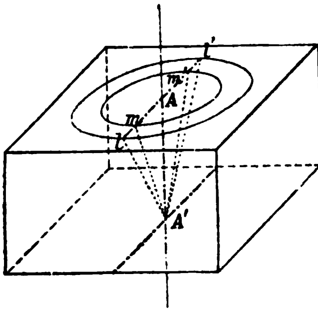


Fig. 71.
Konstruktion des Achsenbildes eines optisch einachsigen Krystalls.



Fig. 72.
[illegible] doppeltbrechenden
[illegible] Krystalls.

die Interferenzfarben um das Zentrum des Gesichtsfeldes bilden (Fig. 72).

Da in einem optisch einachsigen Krystall alle Richtungen senkrecht zur optischen Achse gleichwertig sind, wird beim Drehen des Objekttisches um 360°, wobei nacheinander alle diese Richtungen mit den Schwingungsrichtungen der Nicols zusammenfallen, eine Änderung des Bildes nicht eintreten. Das Interferenzbild eines optisch einachsigen Krystalls in Schnitten senkrecht zu seiner optischen Achse zeigt bei einer vollen Horizontaldrehung keine Änderung.

Die Erscheinungen optisch einachsiger Krystalle in Schnitten senkrecht zur optischen Achse im konvergenten Licht bei Anwendung paralleler Nicols ergeben sich aus der obigen Ableitung von selbst. In demjenigen Hauptschnitt des Krystalls, welcher mit den beiden Schwingungsrichtungen der Nicols zusammenfällt, und ebenso in dem dazu senkrechten, findet keine Zerlegung des Lichtes statt. Es tritt daher ein lichtes Kreuz an Stelle des schwarzen, das ebenso wie jenes konzentrische, farbige Ringe durchschneidet, welche aber an jeder Stelle die Komplementärfarben zu jenen zeigen, die man bei gekreuzten Nicols erhielt.

Ist die Fläche, durch welche man die Beobachtung eines Achsenbildes ausführt, nicht genau senkrecht zur Richtung der optischen Achse, dann ist nicht mehr das in der Mitte des Gesichtsfeldes zur Abbildung kommende Strahlenbündel dasjenige, welches den Krystall parallel zu seiner optischen Achse durchsetzt, sondern irgend ein anderes. Der Schnittpunkt des schwarzen Kreuzes erscheint dann aus der Mitte des Gesichtsfeldes verschoben, und die Farbenringe, deren Zentrum dieser Schnittpunkt bildet, sind exzentrisch in Beziehung auf die Umrandung des Gesichtsfeldes. Dreht man nun das Präparat, so beschreibt der Schnittpunkt des schwarzen Kreuzes einen Kreis um das Zentrum des Gesichtsfeldes (vgl. die obere Reihe in Fig. 73). Die Arme des Kreuzes aber, deren Richtung nur abhängig ist von den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols, deren Lage dabei nicht verändert wird, behalten ihre Richtung bei.

Wenn schliefslich der Schnitt so schief getroffen ist, dafs $w \sin \mu > u$ (wobei w der Brechungsexponent des ordentlichen Strahls in dem betreffenden Krystall, μ der Neigungswinkel des Schnittes gegen die optische

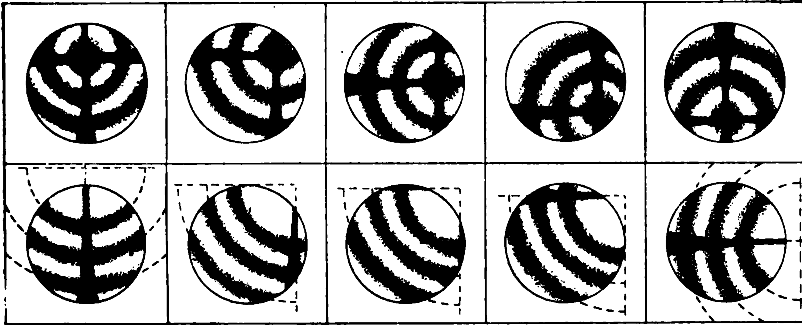


Fig. 73.
Achsenbilder optisch einachsiger Krystalle, welche schief zur Achse geschnitten sind.

Achse und u die Apertur des Beobachtungssystems ist), dafs also die scheinbare Richtung der optischen Achse aufserhalb des Öffnungswinkels des Beobachtungsapparates fällt, so kann man trotzdem meist noch mit ziemlicher Sicherheit einen Anhaltspunkt dafür gewinnen, dafs es sich um einen optisch einachsigen Krystall handelt. Wie die untere Reihe in Fig. 73 zeigt, durchsetzen beim Drehen der Platte die äufseren Teile des schwarzen Kreuzes nacheinander das Gesichtsfeld. Da ihre Richtung stets den Schwingungsrichtungen der Nicols entspricht, treten sie genau parallel zu diesen in das Gesichtsfeld ein, verschieben sich in durchaus paralleler Weise und treten in derselben Richtung wieder aus. Wie später gezeigt wird, liegt darin ein charakteristischer Unterschied gegenüber dem Verhalten eines schief zu einer Achse geschnittenen zweiachsigen Krystalls, bei welchem, wie Fig. 89 (S. 101) zeigt, mit einer Verschiebung des Balkens stets auch eine Drehung Hand in Hand geht. Bemerkt mag hier noch werden, dafs z. B. für Spaltungsstücke von Kalkspat $\omega \sin \mu = 1{,}165$ ist, dafs also der Austritt der Achse aus denselben nur mittels einer Immersion zu sehen ist.

Was endlich das Verhalten einer parallel zur Achse geschnittenen Platte eines optisch einachsigen Krystalls betrifft, so läfst sich dasselbe nicht unterscheiden von einem optisch zweiachsigen Krystall, der parallel zu seiner Achsenebene geschnitten ist, worauf weiter unten eingegangen wird. In einem Schnitt parallel zur optischen Achse ist die Entscheidung, ob einachsig oder zweiachsig, unmöglich; sie wird um so sicherer, je gröfser die Neigung der Platte gegen die optische Achse ist. Doch kann man die Richtung der optischen Achse, bezw., wenn es sich um einen zweiachsigen Krystall mit nicht zu grofsem Achsenwinkel handelt, die Richtung der spitzen Bisektrix in dem Interferenzbild bestimmen. In allen Richtungen senkrecht zur optischen Achse ist die Doppelbrechung gleich; da aber die an dem Rande austretenden Strahlen infolge ihres schiefen Durchgangs eine dickere Schicht des Krystalls durchmessen haben als diejenigen in der Mitte, wird bei einer Neigung von 45° zwischen den Schwingungsrichtungen im Krystall und in den Nicols in denjenigen beiden Sektoren, durch welche die optische Achse (bezw. die spitze Bisektrix) nicht geht, ein Ansteigen der Interferenzfarben zu beobachten sein. Diejenigen Strahlen dagegen, welche den Krystall in der Ebene der Normalen der Platte und der optischen Achse durchsetzen, werden mit der Neigung zu der Normalen

eine Verminderung der Doppelbrechung aufweisen, so dafs die Verzögerung der beiden Strahlen trotz der verhältnismäfsig dickeren Schicht, welche sie infolge ihrer schiefen Lage zu der Plattennormale durchmessen, immer kleiner und kleiner wird, d. h. die beiden Sektoren, durch welche die optische Achse hindurchgeht, zeigen vom Mittelpunkt zum Rande des Gesichtsfeldes stetig abnehmende Interferenzfarben. Das Beispiel einer aus Quarz parallel zur optischen Achse geschnittenen Platte, welches folgende Tabelle giebt, mag dies erläutern. u ist der Neigungswinkel der betreffenden Strahlen gegen die Plattennormale, p die Länge des Weges in der betreffenden Richtung, d der Betrag der Doppelbrechung in derselben, endlich w die sich aus den beiden letzten Faktoren ergebende Verzögerung der beiden durchgehenden Strahlen. I giebt die Werte für jene Richtungen, welche in der Ebene der Plattennormale gegen die optische Achse zu liegen, II für diejenigen, deren Ebene senkrecht zu dieser ist.

		I		II	
u	p	d	w	d	w
0°	1,0000	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091
20°	1,0652	0,0069	0,0073	0,0091	0,0095
40°	1,3054	0,0038	0,0050	0,0091	0,0119
60°	2,0000	0,0010	0,0020	0,0091	0,0182

Während somit die in der ersteren Ebene unter 60° gegen die Plattennormale hindurchgehenden Strahlen nur noch den 4,5. Teil der Verzögerung der parallel zur Plattennormale sich fortbewegenden erreichen, haben die unter demselben Winkel in der zweiten Ebene sich bewegenden Strahlen den doppelten Betrag gegenüber der Verzögerung in der letzteren Richtung.

Das Achsenbild optisch einachsiger Krystalle weist häufig Störungen auf, welche zum Teil in erkennbaren Einlagerungen, Zwillingslamellen etc. ihren Grund haben und dann zu einer Verzerrung des Bildes in verschiedenster Weise Anlafs geben. Man beobachtet das Achsenbild in solchen Fällen nur dann ungestört, wenn die Schwingungsrichtungen der störenden Einlagerung mit den Schwingungsrichtungen der Nicols zusammenfallen. In andern Fällen zeigt sich, dafs das schwarze Kreuz im Interferenzbild bei einer Umdrehung des Präparates gleichfalls nicht unverändert bleibt, dafs es sich vielmehr öffnet und zur Entstehung zweier Hyperbeln Anlafs giebt, die sich bei weiterem Drehen wieder vereinigen. Solche Krystalle zeigen somit das Verhalten optisch zweiachsiger Krystalle mit allerdings meist kleinem Achsenwinkel; da diese letztere Erscheinung sehr weit verbreitet ist, läfst sich häufig keine sichere Diagnose stellen. Endlich kommt der Fall vor, dafs das schwarze Kreuz an sich geöffnet erscheint und auch beim Drehen des Präparates sich nicht schliefst. Dies beruht auf einer Doppelbrechung in den Beobachtungslinsen, und man wird durch eine Drehung des Objektivs die normale Stellung herbeiführen können.

Handelt es sich um sehr dünne Plättchen sehr schwach doppelbrechender Substanzen, so werden selbst die am weitesten gegen die Achse geneigten Strahlenbündel keine hinreichende Doppelbrechung erleiden, um zur Entstehung der höheren, lebhaften Interferenzfarben zu führen. Es wird hier erst am äufsersten Rande des Gesichtsfeldes in den vier Sektoren zwischen den beiden Hauptschnitten der Nicols eine Aufhellung eintreten, während den gröfsten

Teil des Bildes ein breites, stark verwaschen erscheinendes Kreuz einnimmt (Fig. 74). Zur Erkennung ganz schwacher Doppelbrechung bedient man sich auch im konvergenten Licht eines Plättchens, welches für sich das empfindliche Violett I giebt, nach dessen Hinzufügung das an sich nur andeutungsweise sichtbare Achsenbild dadurch hervortritt, daſs zwei gegenüberliegende Quadranten blau, die beiden andern orange werden. Handelt es sich im Gegenteil um dickere Platten oder um sehr **stark** doppelbrechende Substanzen, so machen die enggescharten, lebhaft gefärbten Ringe der unteren Farbenordnungen gegen den Rand zu dem Weiſs höherer Ordnung Platz.

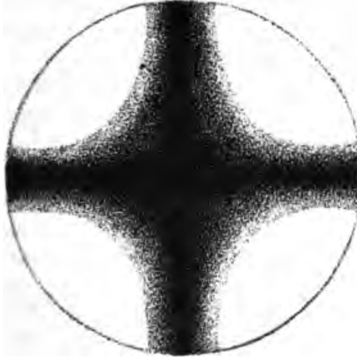


Fig. 74.
Achsenbild eines schwach doppelbrechenden einachsigen Krystalls.

Auf die Erscheinungen, welche optisch einachsige **zirkularpolarisierende** Krystalle im konvergenten polarisierten Licht darbieten, braucht hier nur ganz kurz eingegangen zu werden, da die Erscheinung der Zirkularpolarisation meist erst in sehr viel dickeren Präparaten deutlich hervortritt, als sie bei den mikroskopischen Untersuchungen vorzuliegen pflegen. Als Zirkularpolarisation bezeichnet man die Eigenschaft gewisser Körper, das Licht auch in denjenigen Richtungen zu zerlegen, in welchen die gewöhnliche Art der Doppelbrechung nicht stattfindet. Da alle Richtungen senkrecht zu einer solchen Richtung gleichwertig sind, kann die Zerlegung nur zu kreisförmigen Schwingungen führen, welche sich in einander entgegengesetzten Richtungen in dem Krystall bewegen und verschiedene (meist sehr wenig verschiedene) Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben. Zirkularpolarisation kann somit bei regulären Krystallen in allen Richtungen, bei den doppelbrechenden nur in der Richtung einer optischen Achse stattfinden. Beim Austritt aus dem Krystall setzen sich die beiden kreisförmigen Schwingungen zu einer geradlinig polarisierten Schwingung zusammen, deren Polarisationsebene aber, entsprechend der Verzögerung des einen Strahls gegen den andern, um einen bestimmten Betrag gedreht ist: zirkularpolarisierende Krystalle drehen die Polarisationsebene des Lichtes.

Betrachten wir eine zirkularpolarisierende Krystallplatte bei monochromatischer Beleuchtung im parallelen Licht, so wird sie zwischen gekreuzten Nicols bei hinreichender Dicke hell erscheinen, und bei einer vollen Horizontaldrehung der Platte wird keine Änderung der Helligkeit eintreten. Drehen wir aber den einen der beiden Nicols um einen bestimmten Betrag, so wird die Platte dunkel werden, und man unterscheidet, je nachdem diese Drehung nach rechts oder nach links ausgeführt werden muſs, rechtsdrehende und linksdrehende Krystalle, wobei der Winkel, um welchen der eine Nicol gedreht wird, um volle Dunkelheit zu erreichen, bei bekannter Dicke der Platte einen Maſsstab für die Stärke der Zirkularpolarisation abgiebt. Die Drehung der Polarisationsebene ist nun gewöhnlich für verschiedene Farben auſserordentlich verschieden (bei Quarz z. B. für das äuſserste Violett etwa $2^1/_2$mal

[illegible] das äufserste Rot), infolgedessen geben zirkularpolarisierende [illegible] hinreichender Dicke im parallelen polarisierten Lichte Interferenz-[illegible] aber bei einer vollen Horizontaldrehung der Platte unver-[illegible] bleiben. Dreht man dagegen den einen Nicol, so ändert sich die [illegible] dafs die verschiedenen Farben des Spektrums nacheinander [illegible] bei rechtsdrehenden im Sinne des Spektrums, wenn man den [illegible] dreht, bei linksdrehenden entgegengesetzt.

[illegible] Erscheinungen eines optisch einachsigen zirkularpolarisierenden Kry-[illegible] konvergenten Licht ergeben sich daraus sehr einfach: im Zentrum [illegible] treten die durch die Zirkularpolarisation hervorgebrachten Inter-[illegible] auf, das schwarze Kreuz erscheint hier unterbrochen, und das [illegible] des Bildes zeigt in seiner ganzen Ausdehnung eine bestimmte Inter-[illegible] welche sich ebenso verhält wie die Interferenzfarbe der Platte im [illegible] polarisierten Licht (Fig. 75). Im allgemeinen aber tritt diese Erscheinung im mikroskopischen Präparat meist nicht deutlich hervor, da die Zirkularpolarisation fast stets zu schwach ist, um in den dünnen Schichten eine erkennbare Aufhellung hervorzubringen.



Fig. 75.
[illegible]bild eines zirkularpolarisierenden einachsigen Krystalls.

Diejenigen Strahlenbündel, welche die senkrecht zur Achse geschnittene Platte eines optisch einachsigen Krystalls in irgend einer Richtung schief zu dessen Achse durchsetzen, werden zu zwei Schwingungen zerlegt, von welchen die eine in einem Hauptschnitt, welcher in diesem Falle einfach jeder Radius des Interferenzbildes ist, die andere senkrecht dazu ausgeführt wird. Nehmen wir nun einen der früher besprochenen Kompensatoren, z. B. das Violett I, und schieben denselben so in das Mikroskop ein, dafs seine Schwingungsrichtungen 45° mit denjenigen der Nicols bilden, so liegen die Richtungen gröfster und kleinster Lichtgeschwindigkeit in demselben parallel je zu einem Hauptschnitt des Krystalls. Das schwarze Kreuz erscheint mit dem Violett I, und die Scheitel der vier Sektoren sind abwechselnd blau und orange, weil in zwei gegenüberliegenden Sektoren die Richtung gröfster, in den beiden andern die Richtung kleinster Lichtgeschwindigkeit in dem Gipsplättchen parallel zu je einem Hauptschnitt der Krystallplatte liegt. Bei einem optisch negativen Krystall besitzt der im Hauptschnitt schwingende aufserordentliche Strahl die gröfsere Geschwindigkeit. Es wird also Addition eintreten in denjenigen

Quadranten, welche die Schwingungsrichtung gröſserer Lichtgeschwindigkeit in dem Hilfsplättchen durchschneidet, und diese beiden Sektoren erscheinen blau. (Die Verbindungslinie der blauen Sektoren und die Richtung gröſster Geschwindigkeit in dem Hilfsplättchen geben zusammen ein Minuszeichen.) Bei optisch positiven Krystallen weisen die dazu gekreuzten Sektoren die blaue Interferenzfarbe auf. (Die Verbindungslinie der blauen Sektoren und die Richtung gröſster Geschwindigkeit in dem Hilfsplättchen geben zusammen ein Pluszeichen.)

In ganz analoger Weise ergeben sich charakteristische Reaktionen bei Anwendung des Viertelundulationsplättchens: das schwarze Kreuz zerfällt zu zwei schwarzen Punkten, deren Verbindungslinie einer Schwingungsrichtung in dem Hilfsplättchen

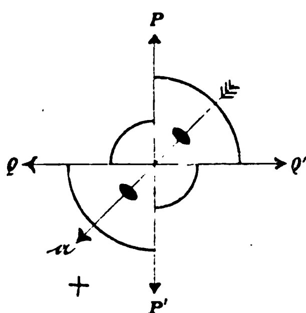


Fig. 76.

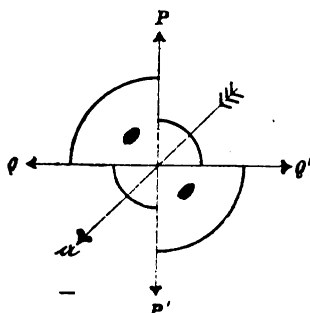


Fig. 77.

Achsenbild eines optisch positiven / optisch negativen Krystalls mit dem Viertelundulationsplättchen.

entspricht, und zwar verläuft diese Linie parallel zu der Richtung gröſserer Lichtgeschwindigkeit des Hilfsplättchens bei positiven (Fig. 76), parallel zu jener kleineren (Fig. 77) bei negativen Krystallen. Gleichzeitig beobachtet man in den betreffenden beiden Sektoren eine Erweiterung, in den beiden andern eine Verengerung der farbigen Ringe.

Diese Verhältnisse sind in Fig. 76 und 77 schematisch dargestellt, wobei die Erscheinungen auf die Richtung gröſster Schwingungsgeschwindigkeit im Glimmerplättchen bezogen sind. Hat man ein Plättchen, in welchem die Richtung kleinster Elastizität in der Längsrichtung liegt, so muſs man die beiden Bilder vertauschen.

Auch das Achtelundulationsplättchen giebt eine sehr charakteristische Erscheinung, indem das schwarze Kreuz zu zwei Kurven auseinandergeht, welche dem Mittelstück einer 8 ähnlich sind. Durch die verengerten farbigen Ringe wird dann die „Achterfigur“ beiderseits geschlossen, und zwar

liegt dieselbe parallel zur Richtung gröfster Geschwindigkeit im Glimmer, wenn der Krystall negativ, umgekehrt, wenn er positiv ist.

Die Untersuchung des Charakters der Doppelbrechung bei sehr dünnen und schwach doppelbrechenden Substanzen liefert mit dem Viertelundulationsglimmerplättchen zwischen gekreuzten Nicols nur sehr unsichere Resultate, da die schwarzen Punkte sowohl als die Ringe aufserhalb des Gesichtsfeldes fallen; hier ist das Rot erster Ordnung vorzuziehen, dessen lebhafte Farbenreaktion auch noch bei den am schwächsten doppelbrechenden Substanzen deutlich ist. Doch giebt auch das Viertelundulationsplättchen selbst eine in fast allen Fällen ausreichende Reaktion, wenn man die Beobachtung nicht bei gekreuzten, sondern bei parallelen Nicols vornimmt. Die vier Winkel des nun erscheinenden bräunlichen Kreuzes sind abwechselnd weifs und tiefbraun in Blau übergehend gefärbt. Die beiden letzteren Quadranten, welche bei negativen Krystallen parallel, bei positiven gekreuzt zu der Richtung gröfster Geschwindigkeit im Glimmer liegen, sind leicht an ihrer Färbung erkennbar. Andernteils liefert bei sehr stark doppelbrechenden Substanzen, bei welchen der innerste Farbenring sehr eng ist, sowie bei kräftiger Färbung des Untersuchungsobjektes selbst, das Glimmerplättchen die besseren Resultate.

2. Das Verhalten optisch zweiachsiger Krystalle im konvergenten polarisierten Licht.

Betrachten wir eine senkrecht zu einer optischen Achse[1] geschnittene Platte eines optisch zweiachsigen Krystalls mit nicht zu kleinem Achsenwinkel im konvergenten polarisierten Licht, so erhalten wir ein Bild, welches demjenigen des optisch einachsigen ähnlich ist. An Stelle des schwarzen Kreuzes aber ist nur ein Balken vorhanden, und statt der genau kreisförmigen Ringe im andern Fall beobachtet man sehr kreisähnliche Ovale (Fig. 78). Der schwarze Balken verläuft parallel zu der Schwingungsrichtung eines der beiden Nicolschen Prismen, wenn die Achsenebene parallel zu dieser zu liegen kommt, d. h. wenn der einzige Hauptschnitt, welcher durch die Platte gelegt werden kann, parallel zur Schwingungsrichtung



Fig. 78.
Achsenbild eines optisch zweiachsigen Krystalls senkrecht zu einer Achse.

[1] Dabei sehen wir zunächst von der Dispersion der Achsen für verschiedene Farben ab. Streng genommen ist eine solche Platte nur für eine bestimmte Farbe senkrecht zu einer Achse.

eines Nicol ist. Wird das Präparat gedreht, so dreht sich der Balken nebst den Ringen um denselben Betrag um denjenigen Punkt, welcher dem Austrittspunkt der optischen Achse entspricht, aber in entgegengesetzter Richtung, bis er nach einer Drehung um 90° parallel zu der Schwingungsrichtung des andern Nicol liegt. Die Schwingungsrichtungen der beiden Nicols bilden so stets die Halbierenden des Winkels zwischen dem dunkeln Balken und der Richtung der Ebene der optischen Achsen. Das parallel zur optischen Achse den Krystall durchsetzende Strahlenbündel erleidet auch hier keine Doppelbrechung, der entsprechende Teil des Bildes wird daher stets dunkel sein, d. h. der Punkt, an welchem die Achse austritt, ist gleichzeitig der Drehungspunkt des schwarzen Balkens, des einzigen Teils des Achsenbildes, welcher stets dunkel ist.

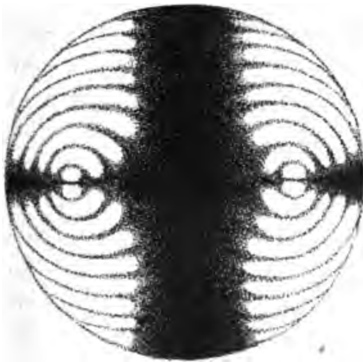




Fig. 79. Fig. 80.
Achsenbilder eines optisch zweiachsigen Krystalls senkrecht zur ersten Mittellinie.

Eine Platte eines rhombischen Krystalls, senkrecht zur ersten Mittellinie geschnitten, zeigt bei paralleler Lage der Ebene der optischen Achsen zu den Hauptschnitten eines der beiden Nicols eine Erscheinung, wie sie Fig. 79 darstellt. Ein schwarzes Kreuz, dessen einer Balken, der parallel zur Achsenebene verläuft, schärfer gezeichnet ist, während der andere, senkrecht dazu, breit und verwaschen erscheint, entspricht den beiden Hauptschnitten, welche man durch die Platte legen kann. Dieses Kreuz teilt symmetrisch ein System lemniskatenähnlicher Kurven, deren innerste geschlossene Ovale sind, während die nach aufsen zu folgenden sich zu einer liegenden Acht (∞) vereinigen. Die Achsen selbst treten in den Brennpunkten des Kurvensystems aus. Dreht man die Platte, so öffnet sich das schwarze Kreuz in der Mitte, je zwei

aneinander anstofsende Arme des Kreuzes vereinigen sich zu einer Kurve, welche nach einer Drehung der Platte um 45° sehr nahezu eine Hyperbel geworden ist (Fig. 80). Gleichzeitig drehen sich zwar die Farbenkurven mit der Platte, ändern aber ihre Form nicht. Die einzigen Punkte, welche bei dieser Drehung stets dunkel bleiben, sind wiederum die Austrittspunkte der beiden Achsen, welche schliefslich die Scheitelpunkte der beiden Hyperbeln bilden. Die Entfernung der beiden Hyperbelscheitel bei einer Stellung der Achsenebene unter 45° zu den Nicols giebt daher ein Mafs für die Gröfse des Winkels der optischen Achsen.

Der Winkel der optischen Achsen für verschiedene Farben ist verschieden, und es ist bald der Winkel für Rot gröfser als der für Blau (Fig. 81), was man mit der Dispersionsformel $\rho > \upsilon$ bezeichnet, oder es ist das Gegenteil der Fall: $\upsilon < \rho$. Ist die Dispersion sehr gering, so ist es schwierig, namentlich bei schwach doppelbrechenden Substanzen, sie im Mikroskop zu betrachten; wenn sie aber bedeutender ist, so sieht man lebhaft gefärbte Ränder die Pole der Hyperbeln des Achsenbildes beiderseits umziehen, welche um so breiter und lebhafter gefärbt sind, je stärker die Dispersion ist. Eine sehr kräftige Dispersion der optischen Achsen erkennt man schon leicht im parallelen polarisierten Licht an den sogen. Dispersionsfarben (vgl. S. 69). Sind die Hyperbeln an der konvexen Seite gelblich, an der konkaven blau umsäumt, so ist der Achsenwinkel für Blau kleiner, also $\rho > \upsilon$. Denn da diejenigen Strahlenbündel, welche einen Krystall parallel zu einer Achse für eine bestimmte Farbe durchsetzen, für diese Farbe keine Doppelbrechung erleiden, erscheint an der betreffenden Stelle des Achsenbildes, d. h. am Scheitel der Hyperbel, die komplementäre Farbe.

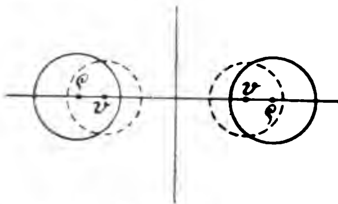


Fig. 81. Rhombische Dispersion.

In rhombischen Krystallen fallen die beiden Mittellinien und die optische Normale für alle Farben mit den drei krystallographischen Achsen zusammen, es kann aber für eine Farbe die eine, für eine andere Farbe eine andere krystallographische Achse die optische Normale sein, d. h. die Achsenebenen für verschiedene Farben sind dann gekreuzt. Jedenfalls aber ist das Achsenbild nach der Achsenebene und der dazu senkrechten Ebene symmetrisch. In monoklinen Krystallen, in welchen nur

noch die Querachse mit einer der Hauptschwingungsrichtungen zusammenfällt, fehlt die Symmetrie nach einer oder nach beiden Ebenen. Man unterscheidet drei verschiedene Arten von monokliner Dispersion:

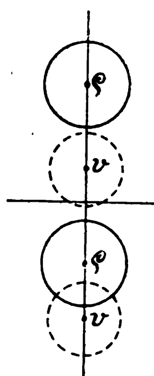


Fig. 82. Geneigte Dispersion.

1. Die Querachse ist optische Normale — geneigte Dispersion. Die optischen Achsen liegen beliebig in der Längsfläche, die beiden Achsen sind verschieden stark dispergiert, das Achsenbild ist noch nach der Achsenebene symmetrisch, aber nicht mehr senkrecht dazu, indem z. B. verschieden starke Farbensäume an den beiden Hyperbelpolen auftreten (Fig. 82).

2. Die Querachse ist zweite Mittellinie — horizontale Dispersion. Die Ebenen der optischen Achsen für verschiedene Farben sind beliebige Ebenen senkrecht zur Längsfläche, das Achsenbild ist nicht mehr symmetrisch nach der Achsenebene, wohl aber in der dazu senkrechten Richtung (Fig. 83).

3. Die Querachse ist erste Mittellinie — gekreuzte Dispersion. Lage der optischen Achsen wie im vorigen Fall; im Achsenbild ist rechts oben gleich links unten (Fig. 84).

Da im triklinen System endlich keine Beziehungen zwischen den optischen Verhältnissen für die verschiedenen Farben mehr vorhanden sind, so erscheint das Achsenbild völlig unsymmetrisch.

Im allgemeinen sind diese Unterschiede der Dispersion ziemlich gering und gelangen nur in günstigen Fällen im Mikroskop deut-

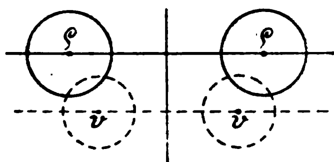


Fig. 83. Horizontale Dispersion.

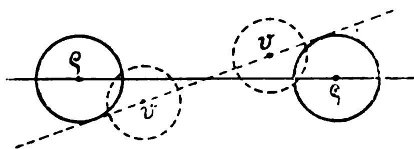


Fig. 84. Gekreuzte Dispersion.

lich zur Beobachtung, so dafs man zwar das Vorhandensein einer wohlcharakterisierten geneigten oder gekreuzten Dispersion als Kriterium für einen monoklinen Krystall benutzen kann, nicht aber aus dem Fehlen wohl erkennbarer Erscheinungen auf das rhombische Krystallsystem schliefsen darf.

Das Vorhandensein einer starken Dispersion der optischen Achsen ist an sich ein gutes Kennzeichen für eine Substanz; indes ist durchaus nicht das Auftreten eines ausgesprochen monoklinen Charakters der Dispersion mit dem Vorhandensein einer an sich kräftigen Dispersion monokliner Krystalle verbunden; so zeigt z. B. der Titanit eine sehr grofse Dispersion der optischen Achsen, während die geneigte Dispersion kaum merklich ist. Bei einer gewissen Gruppe von Pyroxenen anderenteils, welche gleichfalls geneigte Dispersion aufweisen, ist die eine Achse äufserst schwach, die andere sehr stark dispergiert.

Das Achsenbild optisch zweiachsiger Krystalle mit sehr kleinem Achsenwinkel nähert sich demjenigen optisch einachsiger; das schwarze Kreuz erscheint von einem einzigen System kreisähnlicher farbiger Kurven umgeben (Fig. 85), es öffnet sich beim Drehen des Präparates nur noch wenig, und da, wie schon oben bemerkt wurde, solche Erscheinungen nicht selten auch bei einachsigen Krystallen beobachtet werden, ist die definitive Entscheidung sehr schwierig.

Ist andernteils der Winkel der Achsen sehr grofs (Fig. 86), so tritt der Fall ein, dafs die Achsen auch bei Anwendung der stärksten Objektive nicht

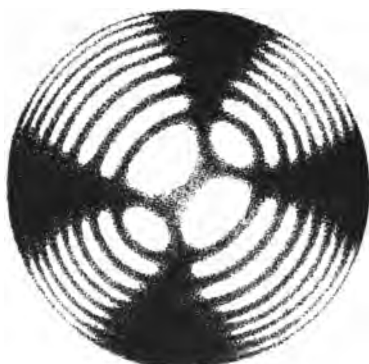


Fig. 85.

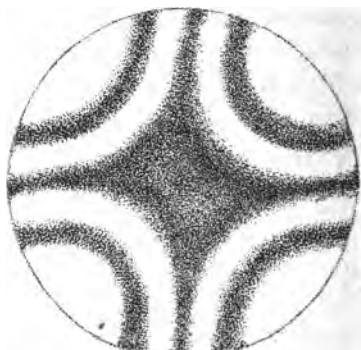


Fig. 86.

Achsenbild eines optisch zweiachsigen Krystalls mit sehr kleinem Achsenwinkel. / mit sehr grofsem Achsenwinkel.

mehr innerhalb des Gesichtsfeldes austreten. Dies ist der Fall, wenn $\beta \sin v > a$ (Apertur des betreffenden Objektivs). Ist $\beta \sin v > 1$, so treten die optischen Achsen überhaupt nicht mehr aus dem Krystall in Luft über, da dann in der Richtung derselben Totalreflexion des Lichtes stattfindet. Man spricht dann wohl auch von einem Achsenwinkel gröfser als 180°. Wendet man aber bei solchen Krystallen ein Immersionssystem an, so wird man in allen Fällen in einem Schnitt senkrecht zur ersten Mittellinie den Austritt der Achsen beobachten können, da dann der Unterschied der Lichtbrechung zwischen dem Krystall und dem ihn umgebenden Medium vermindert, die Ablenkung der aus dem Krystall in die Immersionsflüssigkeit übertretenden Strahlen somit verringert und der Grenzwinkel der Totalreflexion bedeutend vergröfsert ist.

Bei Krystallen, deren Lichtbrechung nicht allzu hoch und deren Achsenwinkel sehr grofs ist, kann man mit Immersionssystemen öfters auch in einem

Schnitt senkrecht zur zweiten Mittellinie beide Achsen im Gesichtsfeld beobachten; dies tritt ein, wenn $\beta \cos v < \alpha$ ist. Die Unterscheidung zwischen stumpfem und spitzem Achsenwinkel kann dann ohne genauere Messung sehr schwierig sein (Plagioklase).

Von besonderer Wichtigkeit ist die Bestimmung der Gröfse des Achsenwinkels, welche nach verschiedenen Methoden ausgeführt werden kann. Die Messung der Entfernung der beiden Hyperbelpole giebt uns nur ein Mafs für den sogen. scheinbaren Achsenwinkel, der von dem wahren Achsenwinkel um so mehr verschieden ist, je gröfser dieser und je höher die mittlere Lichtbrechung des Krystalls ist. Diejenigen Strahlenbündel, welche parallel zu den optischen Achsen die senkrecht zur Halbierenden des Winkels derselben geschnittene Platte durchsetzen, treffen schief auf die Grenze des Krystalls gegen Luft, und da sie dann aus einem stärker lichtbrechenden Medium in ein schwächer lichtbrechendes übersetzen, werden sie nach dem Sinussatz vom Einfallslot weggebrochen (Fig. 87). Der scheinbare Achsenwinkel in Luft ist somit stets gröfser als der wahre. Wenn $2E$ der scheinbare, $2V$ der wahre Achsenwinkel ist, so ist $\sin V = \frac{\sin E}{\beta}$. Wir können also aus dem scheinbaren Achsenwinkel eines Krystalls den wahren erst berechnen, wenn β bekannt ist. So haben z. B. Diopsid und Orthoklas fast genau den gleichen scheinbaren Achsenwinkel in Luft von ca. 118°; da aber beim Diopsid $\beta = 1{,}678$ bedeutend höher ist als beim Orthoklas $\beta = 1{,}524$, so entspricht dieser scheinbare Achsenwinkel beim ersteren einem viel kleineren wahren, nämlich $61\frac{1}{2}°$, während der wahre Achsenwinkel von Orthoklas $= 71°$ ist.

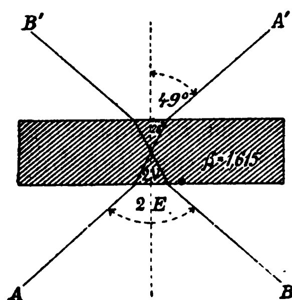


Fig. 87.
Scheinbarer Achsenwinkel.

Was man also im Mikroskop messen kann, ist zunächst nur der scheinbare Achsenwinkel; man benutzt zur Bestimmung desselben die Entfernung der beiden Hyperbelscheitel voneinander, wobei man womöglich in monochromatischem Licht arbeitet. Hat man im Gang des Beobachtungssystems irgend eine Mikrometerteilung, so gilt der Satz von Mallard: $\sin E = D \cdot K$, wobei D die Zahl der Teilstriche, K eine für das betreffende optische System (Objektiv) ein für allemal zu bestimmende Konstante ist, welche

... mittels einer genau senkrecht zur ersten Mittel- ... Platte ausmittelt, deren scheinbarer Achsen- ... ist.

... einfachsten Methode der Beobachtung im konvergenten ... der Lasaulxschen, hat im allgemeinen das Be- ... keine Teilung. Man kann sich zwar eine solche ... des betreffenden Objektivs so einlegen, dafs sie gleich- ... dem Achsenbild scharf gesehen wird. Indes liegt der ... dann darin, dafs das betreffende Objektiv für gewöhn- ... Beobachtungen viel weniger brauchbar ist, und dafs ab- ... von allem übrigen die bei dieser Art der Beobachtung ... gebrachten Bilder äufserst klein, die Fehler der Messung ... sehr grofs sind.

Man verwendet daher zur Messung des scheinbaren Achsenwinkels im Mikroskop am besten die Bertrandsche Linse oder die Kleinsche Lupe, welche beide das Achsenbild vergröfsert zeigen. Die Bertrandsche Linse, welche das Okular zu einem Hilfsmikroskop umformt, gestattet die Messung mittels eines Okularmikrometers, d. h. mittels einer im Brennpunkt des Okulars selbst angebrachten Teilung. An der Kleinschen Lupe dagegen, welche auf das Okular aufgesetzt wird, mufs die Teilung gegen die Lupe selbst verschiebbar in dem Aufsatzstück angebracht sein. Die gleichzeitige richtige Einstellung von Lupe und Teilung ist bei der letzteren Methode ziemlich schwierig und man bekommt infolge einer Parallaxe häufig Fehler in der Messung.

Hat man an Stelle eines festen Mikrometers ein mittels einer Mikrometerschraube verschiebbares Fadenkreuz im Okular, so stellt man den Schnittpunkt desselben nacheinander auf die beiden Scheitelpunkte der Hyperbeln ein und liest auf der Trommel der Schraube die Verschiebung ab. Die Resultate werden dabei noch etwas genauer als mit dem festen Mikrometer. Endlich kann man auch noch mittels eines auf das Mikroskop aufgesetzten Zeichenapparates das betreffende Achsenbild auf ein geteiltes Papier übertragen, was hin und wieder manche Vorteile bietet.

Da aus der Entfernung der Hyperbelpole der Sinus des scheinbaren Achsenwinkels sich ableitet, ist es das einfachste, sich bei diesen Bestimmungen eines sogen. Sinusschiebers zu bedienen, wie er z. B. in der Schwarzmannschen Achsenwinkelskala (Fig. 88) vorliegt. Die beiden Teilungen *a*

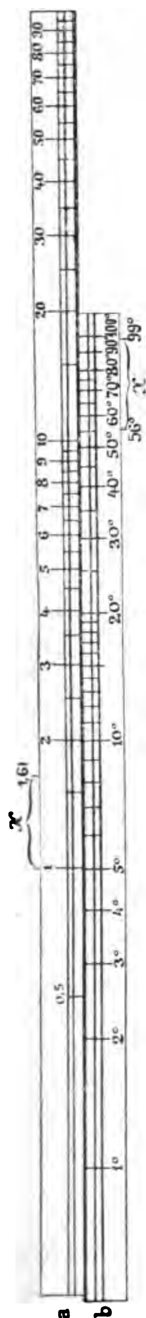


Fig. 88. Schwarzmannsche Achsenwinkelskala.

und *b* sind gegeneinander verschiebbar, die obere giebt die Zahl der Teilstriche, die untere die Gröſse des entsprechenden Achsenwinkels, wenn die beiden sich in einer ein für allemal für das betreffende Objektiv ausgemittelten Stellung befinden. Die Einstellung in Fig. 88 wurde in der Weise ausgeführt, daſs mit einem bestimmten Objektiv der Achsenwinkel für Aragonit an einem festliegenden Mikrometer im Natriumlicht gemessen wurde. Es ergaben sich 5,9 Teilstriche, welche dem scheinbaren Achsenwinkel des Aragonits von 30° 15′ entsprechen. Wird nun 30° 15′ der unteren Teilung genau unter 5,9 der oberen gebracht, so ist die Skala für das betreffende Objektiv eingestellt. Wir untersuchen z. B. eine Platte von Topas und bestimmen 17,6 Teilstriche: so ist der diesem Betrag entsprechende Anteil der unteren Skala 99°, d. h. der scheinbare Achsenwinkel des betreffenden Topases ist 99°.

Die Skala hat noch den weiteren Wert, daſs man ohne jede Rechnung an derselben den wahren Achsenwinkel aus dem scheinbaren ableiten kann, wenn der Wert von β bekannt ist. Man trägt dann den Wert von β in der oberen Teilung ein (z. B. 1,61 für den Topas) und sticht vom Teilstrich 1 bis zum betreffenden Teilstrich den Betrag x mit dem Zirkel ab. Trägt man nun denselben auf der unteren Teilung von dem Wert des gemessenen scheinbaren Achsenwinkels nach rückwärts auf, so erhält man den Wert des wahren Achsenwinkels, in dem gewählten Beispiel etwa 56°.

Die Bestimmung des Charakters der Doppelbrechung ist bei zweiachsigen Mineralien natürlich nur dann von Bedeutung, wenn man sicher ist, daſs man einen Schnitt senkrecht zur ersten oder einen solchen senkrecht zur zweiten Bisektrix vor sich hat. Gerade bei den gesteinsbildenden Mineralien kommt der Fall verhältnismäſsig häufig vor, daſs diese Entscheidung nicht

gerade leicht ist (Plagioklase, Olivin, Epidot u. s. w.), und man wird häufig auf dieses charakteristische Kennzeichen verzichten müssen, da einer positiven ersten eben eine negative zweite Mittellinie entspricht, und umgekehrt. Wenn man aber sicher ist, welche der beiden Mittellinien vorliegt, so ist die Bestimmung nicht schwierig. Man beobachtet dann entweder die Veränderungen, welche ein unter 45° zu den Nicols eingeschobenes Viertelundulationsplättchen in einem Achsenbild hervorbringt, wenn die Achsenebene parallel zu den Schwingungsrichtungen der Nicols ist. Dabei verschwindet das schwarze Kreuz, und die farbigen Kurven werden in der Weise zerlegt, daſs je in zwei gegenüberstehenden Sektoren die Kurven enger bezw. weiter werden. Und zwar findet eine Erweiterung der Kurven in den beiden Sektoren statt, welche die Richtung gröſster Schwingungsgeschwindigkeit in dem Hilfsplättchen durchschneidet, wenn der Krystall negativ ist, und umgekehrt, wenn es sich um einen positiven Krystall handelt. Diese Reaktion ist jedoch nur in gut orientierten und auch sonst günstigen Objekten mit voller Sicherheit festzustellen und wird daher viel weniger verwendet als eine andere, welche auf der Kompensation der Doppelbrechung beruht.

Bringt man das Achsenbild in die 45°-Stellung gegenüber den Nicols, so beobachtet man in der Mitte des Gesichtsfeldes eine Interferenzfarbe, welche der Verzögerung der beiden parallel zu der Richtung der betreffenden Mittellinie durch den Krystall sich fortpflanzenden Strahlen entspricht. Der eine derselben schwingt parallel zur Achsenebene, also mit der Geschwindigkeit, welche der andern Bisektrix zukommt, der zweite mit derjenigen der optischen Normalen. Liegt also z. B. ein optisch negativer Krystall senkrecht zu seiner ersten Bisektrix vor, so schwingt derjenige der beiden Strahlen, welcher seine Schwingungen in der Achsenebene ausführt, parallel zu der zweiten Bisektrix, welche in diesem Falle Richtung kleinster Schwingungsgeschwindigkeit in dem Krystall überhaupt ist, also auch kleiner ist als der senkrecht dazu in Betracht kommende Wert der optischen Normalen. Legt man nun irgend einen Kompensator so ein, daſs dessen Richtung gröſster Schwingungsgeschwindigkeit parallel der Achsenebene in dem Krystall ist, so liegen gleichwertige Richtungen gekreuzt, und es macht den Eindruck, als hätten wir den Krystall dünner gemacht; die Interferenzfarbe sinkt, die Ringe erweitern sich. Ein optisch zweiachsiger Krystall ist

negativ, wenn in einem Schnitt senkrecht zur ersten Mittellinie bei paralleler Lage der Achsenebene und der gröfsten Schwingungsgeschwindigkeit im Kompensator die Doppelbrechung sich subtrahiert, positiv, wenn sie sich addiert, und das Umgekehrte gilt natürlich für die Schnitte senkrecht zu der entsprechenden zweiten Mittellinie.

Es ist ferner noch von Interesse, die Lage der Achsenebene gegen die Umgrenzung des Krystalls kennen zu lernen, da dies hin und wieder ein sehr gutes Kennzeichen abgiebt. Man bringt das Interferenzbild des Krystalls genau in die 45°-Stellung und beobachtet dann das wahre Bild desselben, während der Objekttisch unbewegt bleibt. Die Richtung, welche die beiden Hyperbelpole des Interferenzbildes verbindet, ist die Richtung der

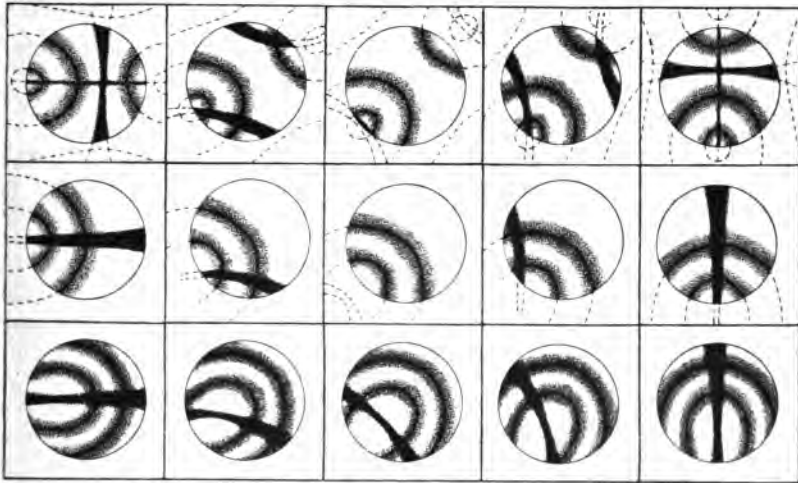


Fig. 89. Achsenbilder optisch zweiachsiger Krystalle, welche schief zur Mittellinie geschnitten sind.

Achsenebene. Es ist dabei gleichgültig, welche Methode der Beobachtung im konvergenten Licht man anwendet, da die Umdrehung des Bildes für die gegenseitige Bedeutung der Richtungen in der Ebene ohne Belang ist.

Diese Umdrehung des Bildes kommt dagegen in Betracht, wenn es sich um eine Neigung der Bisektrix gegen die Vertikale handelt und konstatiert werden soll, in welcher Richtung die Abweichung stattfindet; dann mufs man stets darauf Rücksicht nehmen, dafs man bei der Beobachtung ohne Okular das Interferenzbild gegen das Bild des Objektes verwendet beobachtet, während bei den Beobachtungen mit einem Okular beide Bilder gleich gerichtet sind.

Die Verhältnisse, welche sich ergeben, wenn ein zweiachsiger Krystall schief zu den Hauptschwingungsrichtungen geschnitten ist, zeigt am besten Fig. 89, welche das Verhalten dreier verschie-

denen, beliebig orientierter Schnitte von Topas bei einer Umdrehung des Präparates um 90° zeigen. Im Gegensatz zu den Erscheinungen an optisch einachsigen Krystallen (Fig. 73, S. 87) erkennt man deutlich, dafs die schwarzen Balken sich bei ihrer Verschiebung durch das Gesichtsfeld um den Austrittspunkt der Achse als Zentrum drehen, da in diesem Falle ihre Richtung nicht sowohl von der Lage der Hauptschnitte der Nicols als vielmehr von dem Verhältnis derselben zu den Hauptschwingungsrichtungen in der Platte abhängig ist.

Aufser den Schnitten senkrecht zur ersten Mittellinie und senkrecht zu einer Achse, welche im obigen ausführlicher beschrieben wurden, sind noch von besonderem Interesse diejenigen senkrecht zur zweiten Mittellinie und parallel zur Ebene der optischen Achsen. Ist der wahre Winkel der optischen Achsen in einer bestimmten Substanz sehr nahe an 90°, so ist, worauf schon oben hingewiesen wurde, öfters eine Unterscheidung der ersten und der zweiten Mittellinie schwierig. Will man keine genaue Messung ausführen oder kann man eine solche nicht ausführen, weil kein Objektiv mit genügender Apertur vorliegt, so wird man eine ziemlich brauchbare Reaktion im parallelen polarisierten Licht erhalten. Hat man nämlich zwei gut orientierte Schnitte von gleicher Dicke senkrecht zu je einer Mittellinie, so giebt diejenige senkrecht zur zweiten die höheren Interferenzfarben. Wird der spitze Achsenwinkel kleiner, der stumpfe also gröfser, so wächst natürlich auch diese Differenz der Interferenzfarben, gleichzeitig werden die Lemniskaten in dem Achsenbild senkrecht zur zweiten Mittellinie weiter, die dunkeln Balken kommen nur mit ihren äufsersten Enden in das Gesichtsfeld herein, das sie ganz verwaschen durchstreifen; kurzum, die Änderung ist eine derartige, als würde man mit einem immer schwächeren Objektiv die Beobachtung ausführen. Die umgekehrte Reihenfolge der Bilder in Fig. 70 (S. 84) giebt wohl am besten eine Vorstellung von der allmählichen Änderung dieser Erscheinung. Ist endlich der scheinbare stumpfe Achsenwinkel sehr grofs geworden, so beobachtet man im weifsen Licht nur noch eine Andeutung einer symmetrischen Farbenverteilung in den verschiedenen Quadranten. Die den Hyperbeln entsprechenden dunkeln Balken treten erst in das Gesichtsfeld, wenn die Achsenebene fast völlig parallel zu den Schwingungsrichtungen der Nicols ist, und sind dann sehr breit und wenig abgegrenzt, so dafs es schliefslich den Eindruck macht, als würde die Platte einfach in ihrer ganzen Ausdehnung abwechselnd hell und dunkel. Die letztere Erscheinung tritt in einem Schnitt parallel zur Ebene der optischen Achse auf, von welchem derjenige senkrecht zur Halbierenden eines grofsen stumpfen Achsenwinkels sowie ein solcher parallel zur optischen Achse eines optisch einachsigen Minerals im weifsen Licht nicht unterschieden werden kann. Im monochromatischen lassen sich dieselben hin und wieder voneinander unterscheiden, da den Farbenkurven in weifsem Licht entsprechend im Schnitt senkrecht zur zweiten Mittellinie scharfe, schwarze Kurven auftreten, welche Segmente von Lemniskaten sind und sich am Rande des Gesichtsfeldes gegen den Austrittspunkt der Achsen zu ausbiegen (Fig. 86), während analoge Kurven in dem Schnitt parallel zur Achsenebene eines zweiachsigen Krystalls oder zur Achse eines einachsigen Hyperbeln sind, die eine solche Ausbiegung nicht zeigen. Wenn nun auch diese Reaktion durchaus nicht die zu sicherer Entscheidung nötige Schärfe besitzt, so ist es doch unter Umständen zweckmäfsig, solche Achsenbilder im monochroma-

tischen Licht zu betrachten, da man dann viel besser übersieht, welchen Grad von Genauigkeit die Orientierung des betreffenden Durchschnittes besitzt. So sollte man z. B. niemals die Bestimmung der Auslöschungsrichtung an einem Durchschnitt eines monoklinen Krystalls vornehmen, bevor man sich im konvergenten polarisierten Licht versichert hat, dafs die Schnittrichtung auch thatsächlich der Längsfläche des Krystalls entspricht, welche stets senkrecht zu einer der drei Hauptschwingungsrichtungen ist, also im monochromatischen Licht unter allen Umständen ein zu zwei aufeinander senkrechten Richtungen symmetrisches Achsenbild giebt.

In einem Schnitt parallel zur Achsenebene kann man in derselben Weise, wie dies S. 88 für einen Schnitt parallel zur optischen Achse eines einachsigen Krystalls geschildert wurde, die Richtung der spitzen Bisektrix an der Farbenverteilung im Interferenzbild in der 45°-Stellung deutlich erkennen, vorausgesetzt, dafs der wahre Achsenwinkel sich 90° nicht allzusehr nähert. In den beiden Quadranten, durch welche die spitze Bisektrix geht, tritt Erniedrigung (bezw. bei ziemlich grofsem Achsenwinkel sehr schwache Erhöhung), in den beiden andern Quadranten Erhöhung (bei ziemlich grofsem Achsenwinkel stärkere Erhöhung gegenüber den beiden ersten Quadranten) ein. Die folgenden Zahlen geben die betreffenden Werte für den optisch positiven Gips (Achsenwinkel 59°) entsprechend der Tabelle S. 88, wobei unter I die Werte in der Ebene gegen die spitze, unter II diejenigen gegen die stumpfe Bisektrix zusammengestellt sind.

		I		II	
u	*p*	*d*	*w*	*d*	*w*
0°	1,0000	0,0098	0,0098	0,0098	0,0098
20°	1,0652	0,0089	0,0095	0,0096	0,0100
40°	1,3054	0,0066	0,0086	0,0089	0,0116
60°	2,0000	0,0040	0,0080	0,0082	0,0164

Die in der Ebene I um 60° gegen die Plattenormale geneigten Strahlen zeigen also hier nicht ganz die Hälfte der Verzögerung der entsprechenden Richtungen in der Ebene II.

Zwillingsbildungen und optische Anomalien.

Zahlreiche Krystalle bestehen nicht aus einem einheitlichen Individuum, sondern aus zwei oder mehr Einzelindividuen, welche in gesetzmäfsiger Weise miteinander verwachsen sind; man nennt dieselben Zwillinge oder Viellinge. Die krystallographischen Gesetze, nach welchen solche Verwachsungen auftreten, lassen sich in einfachen Fällen durch genaue mikroskopische Untersuchung feststellen; bei komplizierten Verwachsungen aber sind die Resultate der optischen Methoden, wenn sie nicht durch exakte Krystallmessungen unterstützt werden, nur mit grofser Vorsicht aufzunehmen.

Zwillingsverwachsungen regulärer Krystalle sind unter dem Mikroskop nur an der äufseren Form zu konstatieren; einspringende Winkel z. B. bieten Anhaltspunkte dafür, dafs Zwillingsverwachsungen vorliegen. Auch bei optisch einachsigen Mineralien ist die optische Erkennung von Zwillingen nicht möglich, wenn in den verschiedenen Individuen die Hauptachsen parallel sind. In jedem Schnitt durch einen solchen Zwilling werden die Schwingungsrichtungen beider Individuen und ebenso die Schwingungsgeschwindigkeit des aufserordentlichen Strahls in denselben die gleichen sein, und auch im konvergenten polarisierten Licht ist das Verhalten der verschiedenen Einzelindividuen in diesem Falle übereinstimmend. Ein charakteristisches Beispiel dafür bietet der Quarz, der in eingewachsenen Krystallen ebenso häufig wie in den aufgewachsenen Zwillinge mit parallelen Hauptachsen bildet, die sich aber der mikroskopischen Bestimmung völlig entziehen.

Sind dagegen die Hauptachsen der in Zwillingsstellung befindlichen Individuen gegeneinander geneigt, so wird man in jedem Schnitt schief oder senkrecht zur Zwillingsebene beobachten, dafs die Auslöschung der Teilindividuen nicht gleichzeitig erfolgt, d. h. wenn der eine Teil des Zwillings dunkel erscheint, wird der andere gegen diesen durch die Zwillingsnaht schief abgegrenzt hell erscheinen, und umgekehrt. Man mufs sich dabei aber hüten, voreilig aus dem Winkel, welchen die Auslöschungsrichtungen in beiden Krystallen miteinander bilden, Schlüsse über das Zwillingsgesetz selbst abzuleiten, denn die wahre Neigung der beiden Hauptachsen kann man nur in einem Schnitt bestimmen, in welchem beide Krystalle senkrecht zur Zwillingsebene getroffen sind.

Zwillinge rhombischer Krystalle sind im allgemeinen leichter zu bestimmen. Selbst wenn die Hauptachsen parallel sind, giebt bei kräftig pleochroïtischen Substanzen die verschiedene Färbung der einzelnen Teile hin und wieder Aufschlufs über vorhandene Zwillingsbildungen. Schwierig aber wird die Erkenntnis derselben dann, wenn der Pleochroïsmus nicht deutlich und entweder bei zur Zwillingsebene senkrechter Lage der Achsenebene der Achsenwinkel sehr grofs ist, oder die Bisektrix eines sehr kleinen Achsenwinkels in der Zwillingsebene liegt, da in diesen beiden Fällen in denjenigen Schnitten, in welchen man die Zwillingsverwachsung am besten erkennen könnte, die Auslöschungsrichtungen zusammenfallen und auch die Interferenzfarben sehr ähnlich sind. Im konvergenten polarisierten Licht kann man sich

über die verschiedene Orientierung der einzelnen Teile auch in solchen Fällen meist noch Klarheit verschaffen. Sind andernteils die krystallographischen Achsen der miteinander verwachsenen Krystalle schief zu einander, so ist die Verwachsung an der verschiedenen Auslöschung leicht erkennbar, und die beiden Individuen erscheinen nur dann gleichmäfsig hell, wenn, wie in Fig. 90 (Staurolith), die Neigung der beiden Individuen gegen die Nicols die gleiche ist.

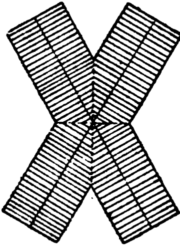


Fig. 90. Zwilling mit geneigten Achsen.

Im monoklinen System sind die meisten Zwillinge solche, bei welchen die Querachse in beiden Individuen parallel liegt. Sind die Krystalle einer Substanz nach dieser Achse prismatisch entwickelt, so wird vor allem die Zone der Querachse selbst zur Untersuchung kommen. Liegen keine stark gegen die Querachse geneigten Schnitte vor, so gilt für solche Krystalle das, was für rhombische mit parallelen Hauptachsen gesagt wurde: sie sind optisch nicht in allen Fällen mit Sicherheit zu erkennen, wie dies z. B. für die aufserordentlich verbreiteten Zwillinge des Epidots gilt, welche nur selten kenntlich sind. In Schnitten dagegen, welche die Querachse schief oder senkrecht treffen, ist an der verschiedenen Lage der Schwingungsrichtungen der Zwilling leicht festzustellen, wie dies Fig. 91 am Beispiel eines Diopsids zeigt.

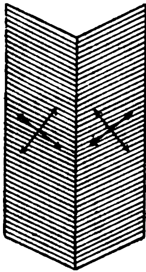


Fig. 91. Monokliner Zwilling.

Was endlich die Zwillinge trikliner Substanzen betrifft, so werden dieselben in allen Durchschnitten kenntlich sein, da die Schwingungsrichtungen im allgemeinen nicht parallel liegen.

Hin und wieder beobachtet man, dafs nicht nur zwei, sondern drei und mehr Individuen in gesetzmäfsiger Weise miteinander verwachsen. Von den Verwachsungen dreier Individuen, den Drillingen, sind besonders die eigenartigen Durchkreuzungsdrillinge gewisser rhombischer und monokliner Krystalle hervorzuheben, welche einen Prismenwinkel von annähernd 120° besitzen. Dieselben lagern sich dann zu scheinbar hexagonalen Krystallen in der Weise zusammen, wie das Fig. 92 zeigt.

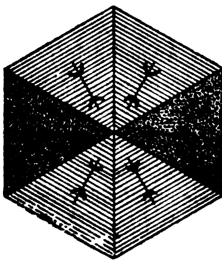


Fig. 92. Durchkreuzungsdrilling.

Die Viellinge endlich nehmen meist die Form lamellarer Verwachsungen an; die Zwillingslamel-

lierung ist namentlich bei monoklinen und triklinen Substanzen sehr verbreitet, fehlt aber auch rhombischen (Olivin), hexagonalen (Kalkspat), tetragonalen (Rutil) nicht, und findet sich schliefslich auch bei regulären (Flufsspat) vor, an welch letzteren sie aber mikroskopisch meist nicht nachgewiesen werden kann. Der ganze Krystall besteht dann scheinbar aus zwei oder mehr Individuen, welche sich gegenseitig lamellenartig durchdringen (Fig. 93, Plagioklas), so dafs das eine Lamellensystem dem einen, das andere dem zweiten Individuum, ein weiteres vielleicht einem dritten u. s. w. angehört. Endlich kommt es vor, dafs ein Lamellensystem, welches durch Zwillingsbildung nach einem bestimmten Gesetz entstanden ist, durchkreuzt wird von einem nach einem zweiten Gesetz eingelagerten System; man bezeichnet diese Erscheinung, welche hin und wieder eine grofse Feinheit des Aufbaus annimmt, als Gitterlamellierung. Fig. 94 zeigt den Fall der Gitterlamellierung nach Albit- und Periklingesetz am Plagioklas.

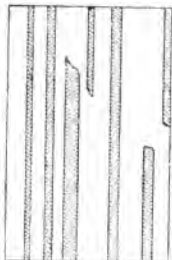


Fig. 93. Zwillingslamellierung.

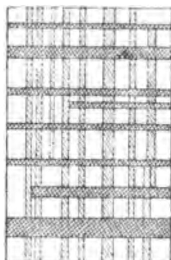


Fig. 94. Gitterlamellierung.

Dieser komplizierte Aufbau der Krystalle aus zahlreichen alternierenden Zwillingslamellen ist zumal in den gröfseren polymorphen Gruppen weit verbreitet (Epidotgruppe. Feldspatgruppe), wo die niederer symmetrische Modifikation durch solche vielfach wiederholte Zwillingsbildung sich in der äufseren Form der höher symmetrischen nähert, eine Annäherung, welche um so vollkommener wird, je feiner die Einzelindividuen sind, bis endlich ein so hoher Grad von Kleinheit der einzelnen Komponenten erreicht ist, dafs man dieselben im Mikroskop nicht mehr trennen kann. Dann pflegt auch die optische Beschaffenheit mit derjenigen der höher symmetrischen Modifikation übereinzustimmen. Dieser allmähliche Übergang von niederer in höhere Symmetrie durch komplizierte Zwillingsbildung ist der Anlafs gewesen zu der Theorie von Mallard, dafs zahlreiche Krystalle der höheren Symmetriegruppen durch solche Zwillingsverwachsungen niederer symmetrischer Individuen entstanden sind.

Anderenteils macht man öfters die Beobachtung, dafs Substanzen, welche bei einer gewissen Temperatur in einem bestimmten Krystallsystem krystallisieren, bei einer Änderung derselben zu einem komplizierten Zwillingsstock niederer symmetrischer Einzelindividuen zerfallen. Seit langer Zeit nachgewiesen ist dies für Leucit und Boracit, welche im Augenblick ihrer Bildung, die wohl in allen Fällen in erhöhter Temperatur erfolgte, regulär krystallisierten, bei der Abkühlung aber in dieser Modifikation nicht mehr beständfähig waren und daher zu einem scheinbar wirren Komplex doppelbrechender Lamellen wurden. Durch Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur kann man an diesen Krystallen den regulären Gleichgewichtszustand wieder herstellen, während die Abkühlung wiederum den Zerfall in die doppelbrechende Modifikation zur Folge hat.

Für die Bestimmung der in den Gesteinen so häufig vorkommenden, aus Zwillingslamellen aufgebauten monoklinen und triklinen Krystalle, welche in

beliebig orientierten Schnitten vorliegen, hat man eine Reihe von Methoden angewandt, welche zum Teil auf den gegenseitigen Beziehungen der verzwillingten Individuen begründet sind. Die einfachste davon ist die Bestimmung der Auslöschungsschiefe in einer Reihe von Schnitten, in welchen die beiden Individuen zur Zwillingsgrenze symmetrische Auslöschung zeigen, die also senkrecht zur Zwillingsebene getroffen sind. Ferner die Bestimmung der Stellungen gleicher Helligkeit, *„égale intensité lumineuse“*, welche sehr dünne Plättchen schwach doppelbrechender Zwillingskrystalle im polarisierten Licht (dickere und etwas stärker doppelbrechende Plättchen nur bei Anwendung von monochromatischem Licht) zeigen. Ein derartiger Zwilling, in dessen beiden Teilen die Schwingungsrichtungen schief zu einander stehen, wird nicht in allen Stellungen zwischen gekreuzten Nicols als solcher erkannt. Vielmehr giebt es bei einer Horizontaldrehung des Krystalls um 360° acht Stellungen, von welchen je vier und vier zu einander gekreuzt sind, und in denen die beiden Hälften gleich hell erscheinen, so dafs also die Zwillingsgrenze völlig verschwindet. Diese beiden Gruppen von je vier Stellungen lassen sich auch noch unter sich dadurch unterscheiden, dafs, wenn die Lamellen sich teilweise keilförmig überlagern, die betreffenden Stellen bei der einen Gruppe ebenso hell wie der übrige Krystall erscheinen, bei der andern aber dunkler sind. Diese Methode der Bestimmung der Stellungen gleicher Helligkeit wurde hauptsächlich für die Bestimmung der Plagioklase fruchtbringend verwertet, hat aber keine allgemeine Anwendung gefunden.

Was die optischen Anomalien betrifft, so beobachtet man dieselben bei mikroskopischen Studien gleichfalls nicht selten. Schwankungen im Winkel der optischen Achsen zweiachsiger Krystalle, ein geringes Auseinandergehen des schwarzen Kreuzes optisch einachsiger Krystalle beim Drehen im konvergenten polarisierten Licht, fleckenartige Aufhellung regulärer Krystalle zwischen gekreuzten Nicols sind ungemein verbreitet. Um Einschlüsse herum tritt in Glas oder regulären Krystallen oft im parallelen polarisierten Licht ein von einem schwarzen Kreuz (Brewstersches Kreuz) durchschnittener, schwach aufhellender Hof hervor.

Sehr verbreitet ist ferner die Erscheinung, dafs äufserlich reguläre Krystalle sich entweder im ganzen oder in bestimmten, regelmäfsig abgegrenzten Teilen optisch nicht normal verhalten, sondern das Licht doppelt brechen. Auf die Erscheinung am Leucit und Boracit und deren Zerfall in Zwillingsstöcke bei der Abkühlung wurde schon hingewiesen; streng genommen gehören allerdings diese gesetzmäfsigen Erscheinungen nicht zu den Anomalien, als welche sie gewöhnlich bezeichnet werden, sondern es sind echte und eigentliche Paramorphosen. Wenn man aber z. B. die Beobachtung macht, dafs gewisse Krystalle durch eine kaum noch chemisch nachweisbare Beimengung einer andern Substanz — sei es dafs beide untereinander isomorph oder nicht

isomorph sind — ihre ganze optische Beschaffenheit ändern, dafs z. B. Krystalle von Kalialaun durch geringe Beimengungen von Ammoniakalaun zu einem Gebilde werden, das bei Erhaltung der äufseren regulären Symmetrie innerlich aus einer Anzahl doppelbrechender Pyramiden aufgebaut ist, so haben wir hierin die eigentliche Form der optischen Anomalien regulärer Krystalle.

Wir machen im allgemeinen die Beobachtung, dafs der Aufbau solcher Krystalle in strengsten Beziehungen zu ihrer äufseren Form steht, so dafs dieselben schliefslich aus ebensovielen Pyramiden zusammengesetzt sind, als sie äufserlich Flächen aufweisen, wobei jede Fläche des Krystalls die Basis einer solchen Pyramide wird, deren Spitzen sich im Zentrum des Krystalls vereinigen. Wo als letzte äufsere Umgrenzung eine Krystallform fehlt, wird der innere Aufbau dadurch natürlich nicht beeinflufst, denn die Störungen der optischen Eigenschaften sind nicht etwas später, d. h. nach Vollendung der Form Hinzugekommenes, sondern sie sind in der innersten Anlage der Krystalle begründet. Solche Felderteilungen beobachten wir ziemlich häufig bei regulären Krystallen, nicht selten auch bei optisch einachsigen. Sie sind aber um so seltener, je geringer die Symmetrie des Krystallsystems ist, da der optisch anomale Krystall in seinem optischen Verhalten stets einer niedereren Symmetriegruppe entspricht, als dem normalen zukommt. Bezeichnend ist, dafs gewisse Verbindungen sehr leicht eine derartige optische Beeinflussung erleiden, so dafs sie fast gar nicht im normalen Zustand bekannt sind, während man die Erscheinungen der optischen Anomalien an andern wiederum gar nicht kennt.

Die als Anomalien der optisch isotropen Körper zusammengefafsten Erscheinungen sind also dreierlei Art: Entweder eine auf die Umgebung von Einschlüssen beschränkte Aufhellung zwischen gekreuzten Nicols mit dem Brewsterschen Kreuz. Diese ist unzweifelhaft durch Spannungen hervorgebracht und findet sich bei amorphen wie bei regulären Körpern. Oder eine der äufseren Form entsprechende Felderteilung, welche wohl im allgemeinen durch fremde, intramolekular eingelagerte Beimengungen entsteht und so gleichfalls den Charakter einer Spannungserscheinung besitzt. Endlich das Auftreten einer Zwillings- oder Gitterlamellierung, die im allgemeinen auf eine Dimorphie der betreffenden Substanz und darauf beruhende Paramorphosenbildung zurückzuführen ist.

Anhang.

Nebenapparate.

Als Beigabe zu einem Mikroskop sind in einzelnen Fällen eine Reihe komplizierter Nebenapparate wünschenswert, welche namentlich bei gewissen Spezialuntersuchungen eine gröſsere Rolle spielen. Sie sollen hier der Vollständigkeit halber angeführt werden. Eine lückenlose Aufzählung derselben und eine detaillierte Beschreibung ist dabei durchaus nicht beabsichtigt, es soll vielmehr nur eine allgemeinere Orientierung über die Anwendbarkeit derselben bezweckt werden. Hauptsächlich drei Gruppen solcher Nebenapparate besitzen eine gröſsere Bedeutung:

1. die Drehapparate,
2. die Erhitzungsapparate,
3. die Reproduktionsapparate,

deren wichtigste Typen im folgenden kurz skizziert werden sollen.

1. Die Drehapparate.

Unter dem Namen der Drehapparate faſst man eine Reihe einfacherer oder komplizierter Mikroskopattribute zusammen, welche eine Drehung der zu untersuchenden Objekte auſser um die Achse des Objekttisches noch um eine oder mehrere weitere Achsen gestatten. Die ältesten derartigen Apparate sollten ausschlieſslich goniometrischen Untersuchungen dienen: es sind dies die sogen. Mikroskopgoniometer, welche heute aber kaum irgend eine Bedeutung mehr haben. Dagegen besitzen wir eine ganze Reihe von Vorrichtungen von den einfachsten Modellen bis zu den eigentlichen Universaltischen, deren Zweck in erster Linie die optische Untersuchung der Objekte in verschiedenen Richtungen ist, die beim Arbeiten mit den Drehapparaten nacheinander zur Beobachtung kommen.

Diese Apparate beruhen hauptsächlich auf zwei verschiedenen Prinzipien. Die einen versuchen die Ablenkung und Totalreflexion der Strahlen beim Durchgang durch den Krystall, dessen Flächen eine gröfsere oder geringere Schiefe zu der Achse des Instrumentes aufweisen, dadurch zu eliminieren, dafs sie den Krystall oder das mikroskopische Präparat zwischen zwei plankonvexe Linsen einlegen, so dafs in jeder Stellung die Eintritts- wie die Austrittsfläche senkrecht zum Gange der Lichtstrahlen ist, welche durch das Präparat hindurchgesandt werden. Oder aber die Beobachtung wird durch Eintauchen des Objektes in eine Flüssigkeit von sehr ähnlicher Lichtbrechung ermöglicht, welche sich in einem parallelwandigen Glasgefäfs befindet. Die erstere Methode hat sich in vielen Fällen bewährt, wo es sich um die Untersuchung von Dünnschliffen handelt; die andere wurde häufiger beim Studium isolierter Krystalle angewandt, in der letzten Zeit aber auch mit grofsem Nutzen auf das Studium der Dünnschliffe übertragen.

a) Drehapparate zur Beobachtung zwischen zwei plankonvexen Linsen.

Der einfachste dieser Nebenapparate besteht nach dem Vorschlag von Schröder van der Kolk ausschliefslich aus einem Linsenpaar, von welchen die eine, mit einem Durchmesser von ca. 25 *mm*, in die Lichtöffnung des Objekttisches eingelegt wird und dort in allen Richtungen gedreht werden kann, während mit der kleineren Linse, von ca. 8 *mm* Durchmesser, das Präparat zentrisch gedeckt wird. Beide Linsen müssen so angefertigt sein, dafs das Präparat selbst möglichst genau in den Brennpunkt des Systems zu liegen kommt, d. h. die untere Linse mufs um die Dicke des Objektglases, die obere um diejenige des Deckglases von der Form einer Halbkugel abweichen. Auf die gröfsere Halbkugel wird mittels eines Tropfens Glycerin das Objektglas des Präparates, welches am besten rund und etwas kleiner ist als der Durchmesser der Linse, aufgelegt, und nun wird die zu untersuchende Partie bei möglichst horizontaler Stellung des Präparates genau zentriert. Abermals mit einem kleinen Tropfen Glycerin wird auf dem Deckglas des Präparates die zweite Linse befestigt und so lange verschoben, bis das zu beobachtende Objekt, das jetzt etwa doppelt so grofs erscheint als zuvor, wieder genau in der Mitte des Gesichtsfeldes ist. Man bestimmt nun zunächst

die beiden Hauptschwingungsrichtungen in dem Objekt und dreht dann die untere Linse um eine dieser beiden Richtungen als Achse, wobei man fortwährend die Erscheinungen im parallelen polarisierten Lichte prüft. Um von den zahlreichen Zufälligkeiten unabhängig zu sein, welche eine solche Drehung aus freier Hand mit sich bringt, kann man zum Drehen einen der Objektklammer in Fig. 14 (S. 15) nachgebildeten kleinen Apparat verwenden, welcher auf dem Präparat federnd aufliegt und um eine horizontale Achse drehbar ist; den Betrag der Drehung kann man an einem kleinen Teilungskreis ablesen.

Man bringt zunächst die betreffende Hauptschwingungsrichtung in parallele Lage zu der Drehungsachse und kann nun die Drehung exakt und in mefsbarer Weise ausführen. Haben wir z. B. prismatisch entwickelte Krystalle, welche gerade auslöschen und im konvergenten polarisierten Licht kein charakteristisches Achsenbild geben, so führen wir eine Drehung zunächst in der Weise aus, dafs die Längsrichtung des Krystalls als Drehungsachse parallel zu einer der Schwingungsrichtungen der Nicols zu liegen kommt. Es sind nun zwei Fälle möglich: entweder der Krystall bleibt bei der Drehung fortwährend ausgelöscht, oder aber es tritt mehr und mehr Aufhellung ein, und man mufs den Krystall nach einer bestimmten Drehung des Nebenapparates wieder um die vertikale Achse um einen bestimmten Betrag drehen, um Dunkelheit zu erreichen. In diesem Fall ist der Krystall monoklin. Blieb der Krystall aber fortwährend dunkel, so wird eine zweite Drehung um die zur ersten senkrechte horizontale Achse ausgeführt und dieselbe Beobachtungsreihe wiederholt. Ist derselbe auch jetzt während der ganzen Drehung dunkel, so ist er tetragonal, hexagonal oder rhombisch; wird er allmählich hell, so ist er monoklin in einer nach der Querachse verlängerten Ausbildung.

War in allen Fällen gerade Auslöschung vorhanden, so nehmen wir die Längsrichtung des Krystalls wieder zur Drehungsachse und stellen dieselbe unter 45° zu den Nicols, so dafs er die lebhaftesten Interferenzfarben zeigt. Dreht man nun um diese Richtung als Achse und tritt keine Änderung der Interferenzfarbe ein, so ist der Krystall optisch einachsig; tritt dagegen eine Änderung ein, so ist er rhombisch. Verfolgt man nun ferner noch alle Änderungen, welche sich hierbei ergeben, im konvergenten polarisierten Licht, zu welchem Zweck man einfach den Tubus um einen geringen Betrag zu heben braucht, ohne sonst die optische Ausrüstung zu ändern, so hat man für die qualitative Erforschung der Krystalle in diesem einfachen Apparat ein äufserst wichtiges Hilfsmittel an der Hand.

Noch vielfacher verwertbar wird dieser Apparat, wenn man sich eine ganze Reihe von den gröfseren Linsen herstellt, welche auf ihrer ebenen Fläche zentrisch eine halbkugelförmige Bohrung von verschiedenem Durchmesser aufweisen. In die so gebildeten Vertiefungen kann man dann gröfsere Krystalle, geschliffene Steine etc. innerhalb einer Flüssigkeit von gleichem Brechungsexponenten im parallelen und im konvergenten Licht nach verschiedenen Richtungen untersuchen, was namentlich bei Edelsteinuntersuchungen vorzügliche Resultate liefert.

Auf demselben Prinzip beruhen eine ganze Reihe anderer Konstruktionen, von welchen hier nur das grofse Modell des Fedorowschen Universaltisches näher beschrieben werden soll. Fig. 95 giebt eine Abbildung dieses mit drei Drehungsachsen versehenen Tisches. Derselbe besteht aus dem Stativ $l_1 l_1$, welches auf den Objekttisch des Mikroskops aufgesetzt wird und in welchem der ganze Tisch mittels der Schraube k um eine horizontale Achse gedreht werden kann — den Betrag der Drehung giebt der mit Nonius versehene Teilkreis T —, während die Achse mittels der Schraube f fixierbar ist. Mit dieser Achse ist der Nonius n_1 fest verbunden, gegen welchen der Tisch K in seiner Ebene um eine zur ersten senkrechte Achse drehbar ist. Dieser Tisch trägt die dritte Achse H, welche eine Drehung in irgend einer Ebene senkrecht zu der Bewegung des Tisches gestattet. Endlich kann noch der Glastisch S mit dem darauf befindlichen Präparat in seiner Ebene gedreht werden.

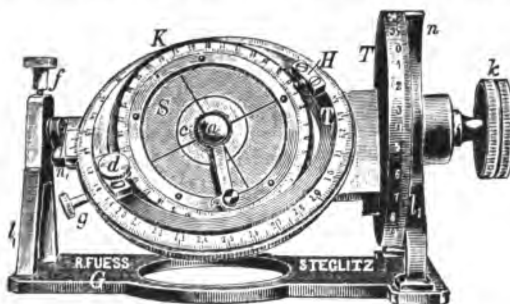


Fig. 95. Fedorowscher Universaltisch.

Auf dem Tisch selbst wird das Präparat mittels Glycerin aufgesetzt und unter dem Glastisch S ebensowohl als über dem Präparate, gleichfalls mit Glycerin, je eine plankonvexe Linse a aufgesetzt. Man kann die Leistungsfähigkeit des Apparates bei der Untersuchung von Krystallen von hoher Lichtbrechung noch bedeutend steigern, wenn man den Objekttisch sowohl als die Linsen und schliefslich die Gläser, innerhalb deren das Präparat eingekittet ist, aus einer Glassorte von höherem Brechungsexponenten wählt und dementsprechend auch eine höher lichtbrechende Flüssigkeit zur Verbindung der einzelnen Teile verwendet. Obgleich nun der Apparat seine Brauchbarkeit für gewisse Untersuchungen (Feldspatstudien) bewährt hat, steht die Genauigkeit der Resultate doch entschieden in keinem Verhältnis zu der komplizierten mechanischen Einrichtung des Universaltisches, und die Notwendigkeit, für die Untersuchungen mit diesem Apparat stets eigene, womöglich auf eine besondere Glassorte aufgesetzte Präparate zu besitzen, ist natürlich gleichfalls ein Hindernis für die weitere Verbreitung derartiger Studien.

b) Drehapparate zur Untersuchung innerhalb von Flüssigkeiten.

Diese von C. Klein vorgeschlagene Methode dient in erster Linie zur Untersuchung von isolierten Krystallen oder Bruchstücken

solcher, sie wurde erst später auf die Untersuchung von Dünnschliffen übertragen. Im einfachsten Fall besteht der Apparat aus einem niedern, an der Unterseite durch eine planparallele Glasplatte verschlossenen Gefäfs mit einem seitlich angebrachten konischen Rohrstutzen, in welchem ein Glaszapfen drehbar ist, der gleichzeitig den Verschlufs bildet und an dem aufsen eine Teilung, innen der Krystallträger angebracht ist. Das Gefäfs wird mit einer Flüssigkeit von möglichst ähnlicher Lichtbrechung gefüllt, wie sie dem zu untersuchenden Krystall zukommt, und dieser letztere, genau senkrecht zu der zu untersuchenden Zone orientiert, auf den Glaszapfen aufgesetzt. Man kann mit diesem Apparat z. B. die Auslöschungsrichtung auf den verschiedenen Flächen einer Zone bestimmen, man kann ferner, wenn die Lichtbrechung der Flüssigkeit mit der mittleren des Krystalls vollständig übereinstimmt, direkt den wahren Achsenwinkel messen u. s. w. Um bei all diesen Nebenapparaten, welche eine gröfsere Entfernung zwischen Objekt und Objektiv notwendig machen, Beobachtungen auch im konvergenten polarisierten Licht ausführen zu können, hat man eigene Objektive mit gröfserer Brennweite und nicht allzu kleinem Gesichtsfeld konstruiert, welche ebenso wie entsprechende Kondensatoren den Drehapparaten beigegeben werden.

Noch weiterer Verwendung fähig ist der gröfsere Universaldrehapparat für Krystalle von C. Klein, welcher infolge der Möglichkeit einer ziemlich genauen Justierung und Zentrierung des auf dem Krystallträger aufgesetzten Krystalls auch recht genaue Messungsresultate zu erzielen gestattet. Bei der Benutzung dieses Apparates wird das Mikroskop in horizontaler Stellung gebraucht und in den Gang der Lichtstrahlen ein kleines, viereckiges Glasgefäfs eingefügt, das die Flüssigkeit enthält, in welche der Krystall eintaucht. Die planparallelen Wände dieses Glasgefäfses, innerhalb dessen der Krystall ohne anzustofsen drehbar sein mufs, müssen möglichst genau senkrecht zur optischen Achse des Mikroskops eingestellt werden.

Schliefslich kann man auch ein kleines Goniometer in ähnlicher Weise mit dem Mikroskoptisch in Verbindung bringen. Man hat dabei aber entweder den Nachteil, dafs wegen der Höhe des Justier- und Zentrierapparates des Goniometers der Fokalabstand der Objektive noch gröfser sein mufs, oder dafs man das Goniometer ganz aufserhalb der Achse des Mikroskops anbringen und die Verbindung durch einen besonders langen Krystallträger her-

stellen mufs; der letztere giebt aber wiederum wegen des langen Hebelarmes schon bei sehr geringen Verschiebungen der Justierschrauben so grofse Ausschläge, dafs sich auch diese Einrichtung nicht als praktisch erwiesen hat.

Für Untersuchungen im Dünnschliff nach dieser Methode wurde der in Fig. 96 abgebildete Apparat konstruiert. Das Gefäfs B, welches zur Aufnahme der Flüssigkeit dient, ist bei a durch eine runde, planparallele Glasplatte verschlossen. S ist der Tisch, dessen Mittelteil aus Glas besteht und auf dem mittels der Klammern e und e_1 das Objekt festgeklemmt wird. Die Schraube k dient. durch Übertragung mittels eines Zahnrades, zur Drehung des Tisches S in seiner Ebene; T gestattet die Bewegung desselben um eine horizontale Achse. Der Apparat wird für verschiedene Objektglasgröfsen angefertigt; es können also die gewöhnlichen Präparate mit demselben untersucht werden, nur mufs man zuvor das Deckglas und etwa anhaftenden Kanadabalsam von denselben entfernen.

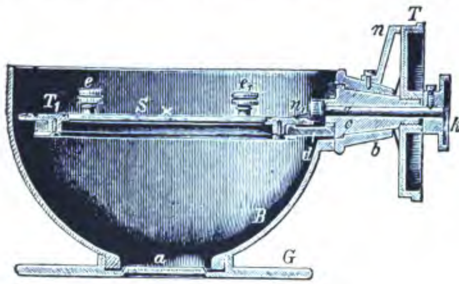


Fig. 96.
Universaldrehapparat für Dünnschliffe von C. Klein.

2. Die Erhitzungsapparate.

Da die optischen Eigenschaften der Krystalle abhängig sind von der Temperatur und einzelne Substanzen schon bei verhältnismäfsig geringen Schwankungen der Temperatur bedeutende Änderungen der optischen Eigenschaften aufweisen, hat man eine Reihe von Apparaten konstruiert, welche die mikroskopische Beobachtung bei erhöhter Temperatur ermöglichen, die aber anderenteils auch möglichst konstant eine bestimmte kontrollierbare Temperatur festzuhalten im stande sein müssen. Aufserdem dienen solche Apparate auch dazu, Krystallisationen bei erhöhter Temperatur *in statu nascendi* zu beobachten, weshalb man die mit solchen Apparaten ausgerüsteten Mikroskope auch Krystallisationsmikroskope nennt.

Die Erhitzungsapparate werden zum Teil in direkte, aber möglichst gut isolierte Verbindung mit dem Objekttisch des Mi-

kroskops gebracht oder sind von diesem unabhängig; die letzteren Konstruktionen benutzt man wohl nur an Mikroskopen mit gleichzeitig drehbaren Nicols (Fig. 13, S. 15). Der Erhitzungsapparat besteht in der Hauptsache aus einem Luftkasten, in welchen das zu untersuchende Präparat eingelegt wird, und dem, sei es durch Gas, sei es durch Sauerstoffgebläse oder Elektrizität, eine gleichmäfsige regulierbare und kontrollierbare erhöhte Temperatur mitgeteilt wird. Da so zahlreiche, gegen erhöhte Temperatur empfindliche Bestandteile an den Mikroskopen vereinigt sind, vor allem die Nicols, die Beobachtungs- und Beleuchtungssysteme, so ist die gröfste Vorsicht auf eine gute Isolierung der Luftkammer und der Wärmezuführung zu verwenden, zumal bei den meisten Versuchen die Temperatur sehr lange auf ihrer Höhe erhalten werden mufs, um eine gleichmäfsige Durchwärmung der im allgemeinen schlecht wärmeleitenden Krystalle zu erzielen. Abgesehen von einer genügenden Asbesthülle des ganzen Apparates wird man, wenigstens bei einigermafsen hohen Temperaturen, Objektive mit doppeltem Mantel verwenden, zwischen welchen man fliefsendes Wasser zirkulieren läfst. Auf die einzelnen Konstruktionen kann hier nicht eingegangen werden, da es deren zu viele giebt und sie zumeist nur für Spezialarbeiten in Frage kommen; erwähnt soll nur werden, dafs derjenige Erhitzungsapparat der beste ist, welcher bei lang anhaltender erhöhter Temperatur die optische Ausrüstung des Mikroskops am wenigsten in Mitleidenschaft zieht, da derselbe gleichzeitig Gewähr für eine möglichst grofse Konstanz der Temperatur leistet.

3. Die Reproduktionsapparate.

Es giebt eine grofse Anzahl von Apparaten, welche den Zweck haben, das im Mikroskop Beobachtete möglichst *ohne jede subjektive Beigabe* zu reproduzieren. Soweit eine solche Reproduktion durch *Mikrophotographie* hervorgebracht werden kann, verdient diese Methode natürlich wegen ihrer absoluten Objektivität den Vorzug. Doch giebt es andernteils eine ganze Reihe von Erscheinungen, welche die photographische Platte nicht mit dem notwendigen Ausdruck wiedergiebt, zumal wenn es sich um verhältnismäfsig untergeordnete Erscheinungen in dem Gesamtbild handelt, deren Wichtigkeit für einen bestimmten Zweck einer gewissen Hervorhebung bedarf.

Über mikrophotographische Apparate soll hier nur soviel gesagt werden, dafs für die Reproduktion der im Polarisationsmikroskop beobachteten Erscheinungen die gröfseren und komplizierten mikrophotographischen Apparate vollständig aufser Betracht bleiben, da die Vergröfserungen, um welche es sich hier im allgemeinen handelt, verhältnismäfsig nicht sehr bedeutend sind. Mit einer gewissen Übung wird man, eine kräftige, gut zentrierte Lichtquelle vorausgesetzt, durch geeignete Verbindung des Mikroskops mit einer beliebigen Camera vollständig zum Ziele kommen, wenn man einfach das vom Objektiv, am besten von einem auf die chemisch wirksamsten Strahlen korrigierten sogen. mikrophotographischen Objektiv, gelieferte reelle Bild des Objektes auf der Platte reproduziert. Im allgemeinen werden, zumal für Photographien im polarisierten Licht, ausschliefslich orthochromatische Platten angewandt. Erst für stärkere Vergröfserungen wird man die Hilfe der Projektionsokulare in Anspruch nehmen. Von einem vertikal auf das Mikroskop aufzusetzenden Apparat ist in den meisten Fällen abzuraten, da die Stabilität der Einstellung dadurch sehr bedenklich leidet; anderenteils soll zur Erzielung einer nicht allzu bedeutenden Beschränkung der Vergröfserung die Camera ausziehbar sein. Mikrophotographien, welche mit Hilfe des Tageslichtes aufgenommen wurden, leiden nicht selten unter Fehlern, welche sich als Folge der langen Expositionsdauer und nicht allzu sorgfältigen Manipulierens während derselben ergeben. Weitaus vorzuziehen, schon wegen der gröfseren Konstanz der Lichtstärke, sind künstliche Beleuchtungsarten, unter welchen das Kalklicht und die Bogenlampe in erster Linie stehen. Zu den Farbenfiltern, die in der organischen Mikrophotographie eine so grofse Rolle spielen, wird man hier nur in ganz speziellen Fällen seine Zuflucht nehmen. Auch die Photographie der Erscheinungen im konvergenten polarisierten Licht ist verhältnismäfsig recht einfach, indem man das von einer Bertrandschen Linse hervorgebrachte reelle Bild direkt auf der photographischen Platte auffängt. Die für die gewöhnlichen Untersuchungen dienenden Bertrandschen Linsen haben im allgemeinen eine zu geringe Brennweite, um das Bild aus dem Tubus des Mikroskops heraus zu projizieren. Für Photographie und Projektion von Achsenbildern werden daher besondere Linsen mit gröfserer Brennweite benötigt. Schliefslich mag noch bemerkt werden, dafs auch die Herstellung farbiger Photographien

der Interferenzfarben mittels des Dreifarbensystems auf das vollständigste gelungen ist.

Was die andere Gruppe hierher gehöriger Apparate betrifft, die Zeichenapparate, so giebt es deren eine grofse Anzahl in verschiedensten Konstruktionen, welche insgesamt auf dem Prinzip der Camera lucida beruhen: das im Mikroskop beobachtete Bild wird auf die Zeichenfläche geworfen und soll dort bei gleichmäfsiger Schärfe über das ganze Sehfeld und mit möglichst geringem Lichtverlust mit einem gleichzeitig scharf eingestellten Stift nachgezeichnet werden können. Besonders zwei von diesen Konstruktionen haben sich als zweckmäfsig bewiesen: in erster Linie der Abbesche Zeichenapparat, sodann derjenige von Nachet, von welchen der erstere den Vorzug hat, dafs selbst bei Gebrauch der stärksten Objektive kein Lichtverlust eintritt.

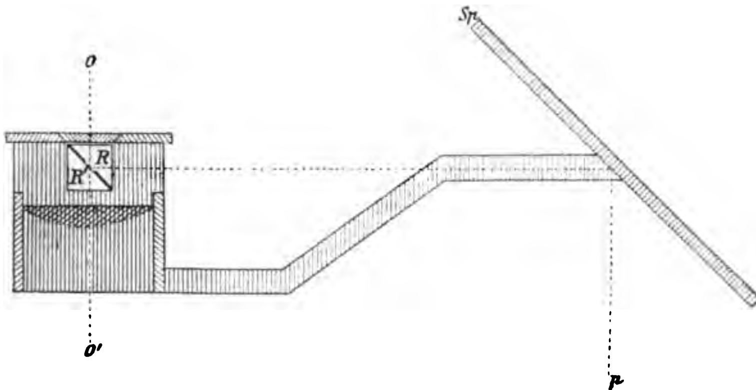


Fig. 97. Zeichenapparat nach Abbe.

Der Abbesche Apparat (Fig. 97) besteht aus zwei sich zu einem Würfel ergänzenden, zusammengekitteten Prismen, welche an der Berührungsstelle mit Ausnahme einer kleinen zentralen Partie versilbert sind. Durch diese Öffnung erhält das Auge das Bild des Objektes *o* aus dem Okular, während anderseits ein drehbarer Spiegel, in einer Entfernung von 70 *mm* angebracht, das Bild der Zeichenfläche auf die versilberte Grenzfläche wirft, von welcher sie in das Auge reflektiert wird. Die verschiedene Stärke der Beleuchtung des Objektes und des Zeichenfeldes kann noch durch Einschiebung verschieden tief gefärbter Rauchglasplättchen in den Gang der von letzterem ausgehenden Strahlen reguliert werden.

Der Zeichenapparat von Nachet (Fig. 98, S. 118) besteht aus einem Prisma mit rhombischem Querschnitt *a b c d*, an dessen vorderer, über dem Okular befindlicher Seite das kleine Prisma *e f g* aufgekittet ist; die von dem Objekt kommenden Strahlen *o* treffen die senkrecht dazu gestellte Kathete des letzteren und gehen durch dasselbe ungebrochen zum Auge. Dagegen erleiden die

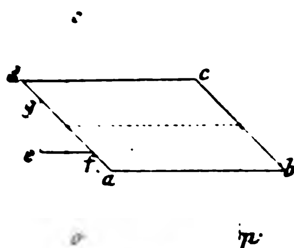
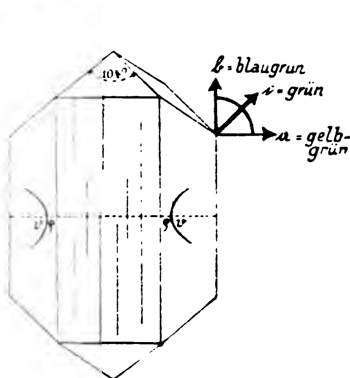


Fig. 98.
Zeichenapparat nach **Nachet.**

vom Zeichenstift herkommenden Strahlen *p* an *cb* und *ad* Reflexion und treten mit jenen gleichgerichtet aus dem Apparat aus.

Dafs man mittels dieser Apparate auch die Zeichnung von Achsenbildern ausführen kann, versteht sich von selbst. Unter Umständen kann es für Messungen sehr zweckmäfsig sein, wenn man auf diese Weise die erhaltenen Achsenbilder auf einem Millimeterpapier nachzeichnet, welches dann gleichzeitig den Mafsstab für die Bestimmung abgiebt.

Schliefslich soll hier noch eine Methode der **Krystallzeichnung** kurz erwähnt werden, welche sich als sehr praktisch und übersichtlich bei der mikroskopischen Untersuchung von Krystallen erwiesen hat, weil diese einfachen Skizzen einen vorzüglichen Überblick über die ganze optische Beschaffenheit ermöglichen. Nachdem man Form, Spaltbarkeit, Einschlüsse etc. möglichst naturgetreu, eventuell mit Hilfe eines Zeichenapparates, skizziert und die gemessenen Winkel eingetragen hat, werden die Schwingungsrichtungen bestimmt und durch Pfeile in der Zeichnung angedeutet. Die Bestimmung des relativen Wertes der beiden in einem Durchschnitt schwingenden Strahlen, verbunden mit der Untersuchung im konvergenten Licht, giebt die Richtung der Achsen gröfster, mittlerer und kleinster Schwingungsgeschwindigkeit, welche in der Figur mit 𝔞, 𝔟 und 𝔠 bezeichnet werden. Die Stärke der Lichtbrechung wird in der Weise angedeutet, dafs bei einer Übereinstimmung mit der Lichtbrechung des Kanadabalsams der betreffende Pfeil ganz fein ausgezogen wird;



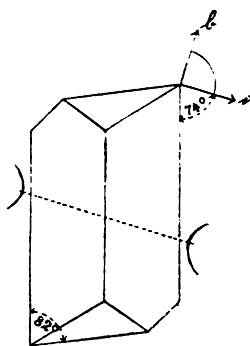


Fig. 99. Fig. 100.
Krystallskizzen.

ist die Lichtbrechung noch niedriger, so wird der Pfeil gestrichelt; ist sie höher, so wird er um so stärker ausgezogen, je mehr sich die Lichtbrechung der betreffenden Richtung von derjenigen des Kanadabalsams entfernt. Nun bestimmt man einen eventuell vorhandenen Pleochroïsmus und schreibt neben den Pfeil die Farbe, welche der betreffenden Richtung entspricht. Die aus

den Interferenzfarben erschlossene Höhe der Doppelbrechung wird durch Bögen eingezeichnet, welche die Pfeile der Schwingungsrichtungen verbinden, wobei wiederum mit gestrichelten Linien bei sehr schwacher Doppelbrechung begonnen wird und die Linien um so stärker auszuziehen sind, je höher die Doppelbrechung ist, bei besonders starker Doppelbrechung werden sie verdoppelt. Die Untersuchung im konvergenten Licht ergiebt, ob die Substanz optisch einachsig oder zweiachsig ist. Ist ersteres der Fall und tritt die Achse senkrecht aus, so legt man um das Zentrum der Skizze einen kleinen Kreis mit schwarzem Kreuz; liegt dagegen die Achse parallel zu der Zeichnungsebene, so verlegt man dasselbe Zeichen aufserhalb der Zeichnung; liegt sie schief, so zeichnet man das Achsenbild ungefähr in der Weise an den Rand des Krystalls, in welcher man dasselbe im Mikroskop sieht. Ist der Krystall optisch zweiachsig, so zeichnet man die Achsenebene in ihrer wahren Lage ein und versucht sowohl die Symmetrie des Austrittes der optischen Achsen als auch die ungefähre Gröfse des Winkels der optischen Achsen in der Skizze wiederzugeben. Es giebt selbstverständlich Fälle, in welchen eine solche Skizze die Übersicht über die optischen Eigenschaften nicht durchaus ermöglicht, in sehr zahlreichen Fällen aber wird durch dieselbe eine umständliche Beschreibung erspart und ein rascher Überblick über die gesamten optischen Eigenschaften eines Krystalls vermittelt, soweit dieselben durch die qualitativen Methoden der mikroskopischen Technik erkannt werden. Beispiele derartiger Zeichnungen geben Fig. 99 und 100: erstere bezieht sich auf Krystalle eines wasserhaltigen basischen Kupfersulfats, letztere auf das dem Vivianit entsprechende, künstlich dargestellte Mangansalz.

Berichtigung.

S. 50 Z. 14 v. o. sind α und γ zu vertauschen.

Register.

Abbescher Beleuchtungsapparat 8.
Abbescher Zeichenapparat 117.
Aberration 19.
Ablenkung des Lichtes 25.
Absorption des Lichtes 53.
Achromatisch 20.
Achse, optische 48.
Achsenbild 82.
— einachsiger Krystalle 86.
— zweiachsiger Krystalle 93.
Achsenebene 50.
Achsenfarben 53.
Achsenwinkel, Messung 97.
— scheinbarer, wahrer 97.
Achsenwinkelskala 99.
Addition der Doppelbrechung 75.
Analysator 13.
Anisotrop siehe doppelbrechend.
Anomale Interferenzfarben 69.
Anomalien, optische 107.
Apertur 8.
Aplanatisch 19.
Apochromat 20.
Ätzfiguren 43.
Aufhellungsflüssigkeiten 30.
Auflösungsfähigkeit 21.
Auslöschungsrichtung 58.
Auslöschungsschiefe 60.
Aufserordentlicher Strahl 45.

Babinetscher Kompensator 78.
Beleuchtung, schiefe 29.
Beleuchtungsapparat 8.
Beleuchtungskegel, Einengung 28.
Bertrandsche Linse 83.
— Platte 63.
Bild, reelles, virtuelles 6.
Binokularmikroskop 35.
Biotsche Quarzplatte 64.
Birefraktometer 78.
Bisektrix 50.
Bravaissche Doppelplatte 64.
Brechung des Lichtes 25.
Brechungsexponent 26.
Brechungsexponenten der Thouletschen Lösung 29.
— verschiedener Flüssigkeiten 31.
Brewstersches Kreuz 107.
Brezinasche Doppelplatte 62.

Calderonsche Doppelplatte 63.
Chagrin (Rauheit) 34.
Charakter der Doppelbrechung 49.
— — einachsiger Krystalle 90.
— — zweiachsiger Krystalle 99.
Chromatische Aberration 19.
Crownglas 20.

Dichroïtisch 53.
Dickenmessung 40.
Dilute Färbung 43.
Dispersion der Mittellinien 95.
— der optischen Achsen 94.
— der Schwingungsrichtungen 69.
Dispersionsfarben 69.
Doppelbrechend 45.
Doppelokular 35.
Doppelplatte, Bravaissche 64.
— Brezinasche 62.
— Calderonsche 63.
Drehapparate 109.
Drehung der Polarisationsebene 89.
Drillinge 105.
Dünnschliff 7.
Durchkreuzungszwillinge 105.
Durchsichtig 42.

Ebene der optischen Achsen 50.
Égale intensité lumineuse 107.
Einachsig 48.
Einengung des Beleuchtungskegels 28.
Einfachbrechend 44.
Einschlüsse 41.
Elastizität 50.
Erhitzungsapparate 114.
Extraordinärer Strahl 45.

Fadenkreuz 12.
Falsches Licht 18.
Farbe 42.
Farbenachsen 53.
Farbenzerstreuung 20.
Farblos 42.
Färbung, dilute 43.
— durch Einschlüsse 43.
Fedorowscher Glimmerkeil 77.
— Universaltisch 112.
Felderteilung 108.
Flächenfarbe 52.
Flintglas 20.
Flüssigkeiten, Lichtbrechung 31.
Flüssigkeitseinschlüsse 41.
Form 36.
Fortpflanzungsgeschwindigkeit 25.

Gaseinschlüsse 41.
Gaufssche Spiegelvorrichtung 37.
Gefärbt 42.
Gekreuzte Dispersion 95.
— Nicols 44, 65.
Geneigte Dispersion 95.
Gerade Auslöschung 59.
Gitterlamellierung 106.
Glanz 43.
Glaseinschlüsse 41.
Gleitflächen 38.
Glimmerkeil 77.
Glimmerplättchen 77.

Halbschattenpolarisator 64.
Hauptschnitt 45.
Hauptzone 80.
Helligkeit, gleiche 107.
Homogenes Licht 18.
Horizontale Dispersion 95.

Indikatoren, optische 29.
Interferenzbild 82.
— einachsiger Krystalle 86.
— zweiachsiger Krystalle 93.
Interferenzfarben 65.
—, anomale 69.
—, Ordnungen 68.
Interferenzstreifen 73.
Irisblende 28.
Isotrop, optisch 46.
Justierung 23.

Kanadabalsam 30.
Kleinsche Lupe 83.
Kleinscher Universaldrehapparat 113.
Kobellsches Stauroskop 62.
Komparator 70.
Kompensation der Doppelbrechung 75.
Kompensatoren 76.
Kondensor 9.
Kondensor, Entfernen desselben 16.
Konische Refraktion 72.
Konvergentes Licht 81.
Kreuzschlittentisch 15.
Krystallform 36.
Krystalliten 38.
Krystallskelette 38.
Krystallzeichnung 118.

Lamellierung 105.
Lasaulxsche Methode 82.
Leesonsches Prisma 36.
Libelle 41.
Lichtabsorption 53.
Lichtbrechung 25.
Lichtstärke 21.
Linksdrehend 89.
Lückenhaftes Wachstum 37.
Lupe 5.

Mallardsche Theorie 106.
Mallardscher Satz 97.
Messung der Doppelbrechung 70.
— der Gröfse 39.
— der Winkel 36.
Mikrometer 39.
Mikrometerschraube 12.
Mikrophotographie 115.
Mikrorefraktometer 29.
Mikroskop, stereoskopisches 35.
— zusammengesetztes 5.
Mikroskopgoniometer 109.
Mittellinie 50.

Nachets Zeichenapparat 117.
Negativ, optisch 49.
Nicol 10.
Nicols, gekreuzte 44, 65.
Normale, optische 51.
Numerische Apertur 8.

Objektiv 6.
Objektivzange 13.
Objektklammer 15.
Objektmarkierer 18.
Objektmikrometer 39.
Objekttisch 15.
Öffnungswinkel 8.
Okular 6.
Okularblende 84.
Okulardichroskop 52.
Okulargoniometer 37.
Okularmikrometer 39.
Opak 42.
Optisch isotrop 45.
Optische Achse 48.
Optische Anomalien 107.
Ordentlicher, ordinärer Strahl 45.
Ordnungen der Interferenzfarben 68.

Paralleles Licht 27.
Parallele Nicols 65.
Paramorphosen 106.
Pleochroïsmus 54.
Pleochroïtische Höfe 55.
Polarisation 9.
Polarisationsebene 9.
Polarisationswinkel 9.
Polarisator 16.
— Ausschaltung desselben 17.
Positiv, optisch 49.
Pseudochroïsmus 43.
Pseudodichroïsmus 55.

Quarzkeil 78.
Quarzkeilkomparator 70.
Quarzplatte, Biotsche 64.

Ramsdensches Okular mit Irisblende 84.
Rechtsdrehend 89.
Reelles Bild 6.
Relief 33.
Reproduktionsapparate 115.
Rot erster Ordnung siehe Violett.

Scheinbarer Achsenwinkel 97.
Schiefe Auslöschung 60.
Schiefe Beleuchtung 29.
Schröderscher Drehapparat 110.
Schwarzmannsche Achsenwinkelskala 99.
Schwingungsgeschwindigkeit 50.
Schwingungsrichtungen 58.
Spaltbarkeit 38.
Sphärische Aberration 19.
Spiegelvorrichtung, Gaufssche 37.
Stauroskope 62.
Stereoskopisches Mikroskop 35.
Stereoskopokular 35.
Strahlengang im konvergenten Licht 81.
Strahlengang im Mikroskop 5.
Symmetrische Auslöschung 59.

Teinte sensible 63.
Testobjekte 21.
Thouletsche Lösung, Brechungsexponenten 29.
Totalreflexion 26.
Totalreflektometer nach C. Klein 29.
— nach Wallerant 30.
Trichroïtisch 53.
Trieb 13.
Trikline Dispersion 95.

Undurchsichtig 42.
Universaldrehapparate 113.
Universaltisch 112.

Vertikalilluminator 43.
Verzerrung der Bilder 19.
— der Krystalle 37.
Viellinge 103.
Viertelundulationsglimmerplättchen 77.
Violett, empfindliches 67, 77.
Virtuelles Bild 6.

Wahrer Achsenwinkel 97.
Weifs erster Ordnung 68.
— höherer Ordnung 68.
Winkel, Messung der 36.

Zeichenapparate 117.
Zeichnung von Krystallen 118.
Zentrierung 22.
Zentrumsblende 29.
Zirkularpolarisation 89.
Zweiachsig 50.
Zwillinge 103.
Zwillingskompensator 79.
Zwillingslamellierung 105.
Zwillingspolarisator 64.

